

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA



CONSTRUCCIÓN DE UN CUADRIROTOR CAPAZ DE REALIZAR TRAYECTORIAS Y ATERRIZAJES DE MANERA AUTOMÁTICA CON UNA PRECISIÓN CENTIMÉTRICA PARA USO EN TAREAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

Por:

EZRI LEANA SÁNCHEZ

TESIS:

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Saltillo, Coahuila, México
Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

CONSTRUCCIÓN DE UN CUADRIROTOR CAPAZ DE REALIZAR TRAYECTORIAS Y
ATERRIZAJES DE MANERA AUTOMÁTICA CON UNA PRECISIÓN CENTIMÉTRICA
PARA USO EN TAREAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

Por:

EZRI LEANA SÁNCHEZ

TESIS:

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

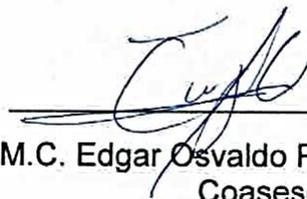
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Hugo Gutiérrez Flores
Asesor principal



M.C. Andrés Cadena Díaz
Coasesor



M.C. Edgar Osvaldo Padrón Cisneros
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México. Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

CONSTRUCCIÓN DE UN CUADRIROTOR CAPAZ DE REALIZAR TRAYECTORIAS Y
ATERRIZAJES DE MANERA AUTOMÁTICA CON UNA PRECISIÓN CENTIMÉTRICA
PARA USO EN TAREAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

Por:

EZRI LEANA SÁNCHEZ

TESIS:

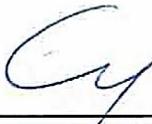
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobada por el Jurado Examinador:



Dr. Hugo Gutiérrez Flores
Asesor principal



M.C. Andrés Cadena Díaz
Coasesor



M.C. Edgar Osvaldo Padrón Cisneros
Coasesor



MC. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México. Diciembre 2024

Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Ezri Leana Sánchez

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por el regalo de la vida y la oportunidad de poder cursar una carrera profesional, así como también darme la capacidad, actitud y aptitud para poder cursar una ingeniería, “EBENEZER” (hasta aquí nos ayudó Jehová).

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por recibirme en sus instalaciones y facilitar los medios para poder estudiar la ingeniería.

Al **Dr. Hugo Gutiérrez Flores**, por brindarme la oportunidad para trabajar en este proyecto, así como también por la paciencia mostrada a mi persona en los muchos problemas presentados, de igual manera por apoyar económicamente el proyecto cuando fue necesario, gracias Doctor por sus consejos no solo profesionales si no en mi vida personal.

Al **M.C. Edgar Osvaldo Padrón Cisneros**, por el apoyo presentado al proyecto en sus diferentes etapas, gracias por las pláticas amenas para mitigar la fatiga del proyecto.

Al **M.C. Andrés Cadena Díaz**, por el tiempo invertido en la revisión del escrito, así como los conocimientos compartidos.

Dr. Mario Méndez Dorado, por brindar las facilidades para el uso de las instalaciones del departamento en horarios extendidos, al igual por sus consejos.

A mis profesores del departamento de maquinaria agrícola, **M.C. Héctor Uriel Serna Fernández, M.C. Juan Antonio Guerrero Hernández, Dr. Martin Cadena Zapata, M.C. Gilbert Fresh López López, M.C. Gerardo Sánchez Martínez** por compartir sus conocimientos y formar parte de mi formación profesional.

A mis compañeros **Maximino Torres Tendero, Rubén Díaz Gálvez, Daniel Rivera Gracida, Luis Javier Crisóstomo Alonso, Diego Ramírez Ortiz, Efraín Rivera Jiménez, Francisco Yamir González Núñez, Alonso Reyes Lara**, por su amistad, compañerismo y ayuda cuando fue requerida, gracias por hacer más placentera la estancia en la universidad.

A la **Ing. Eridany Muños Castro**, por su apoyo a mi persona en los primeros semestres de la carrera y cuando se le requirió, gracias por brindarme un plato de comida en su hogar.

DEDICATORIAS

A mis padres, **Sra. Nohemi Sánchez Valez**, madre hermosa, tierna y cariñosa, **Sr. Mario Leana Ortiz**, padre amoroso, hombre caballeroso, carismático que enseña con el ejemplo. Con todo el amor, gratitud y respeto que se merecen, esto es por y para ustedes, porque ustedes me dieron la mejor educación que se puede dar: los valores de un buen hogar. Por todo el esfuerzo y sacrificio para que yo pudiera cursar mi educación superior, gracias por la confianza y sobre todo por los consejos y apoyo incondicional en todo momento. Gracias por darme todo para poder salir adelante, a pesar de que ustedes no tuvieron la oportunidad de estudiar a mí nunca me faltó nada. También gracias por la paciencia en la espera de la culminación del proyecto, lo logramos. Gracias por ser los mejores padres del mundo, los amo mucho.

A la **Ing. Jehieli Leana Sánchez**, hermana chula, por el apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida, por siempre estar presente aun a la distancia, mi más grande admiración por tu tenacidad y dedicación, gracias porque en parte por ti soy “buitre”, te quiero mucho.

A **Obed Leana Sánchez**, hermano querido, porque gracias a ti puedo caminar y siempre te lo voy a agradecer, gracias por toda tu ayuda porque sin tu intervención en ese proceso difícil de mi vida, posiblemente este trabajo no se hubiese realizado, gracias por estar siempre presente carnal, te quiero mucho.

A **Mariel Jireth Leana Sánchez**, hermana pequeña, gracias por soportar la distancia que implica el venirme a estudiar a este lugar, gracias por todos tus escritos, dibujos y muestras de cariño a la distancia los cuales me daban fuerzas para poder seguir adelante, te toca ser la más pequeña de la casa pero eres el más grande motor que nos impulsa a seguir echándole ganas, te quiero mucho.

A mis abuelitas queridas **Alejandra Valez Rosales** y **Martha Ortiz Rios (+)**.

A mis tías **Alelís Arredondo Ortiz** y **Dina Arredondo Ortiz**.

A mis primos **David Sánchez** y **Samuel Sánchez**.

A toda mi familia que de una u otra manera me apoyaron y estuvieron presentes en este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.1.1 Antecedentes	2
1.1.2 Formulación del problema	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Hipótesis.....	6
REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1 Definición de dron.....	7
2.2 Clasificación de los drones	7
2.2.1 Drones híbridos	9
2.2.2 Drones de ala fija.....	9
2.2.3 Drones de ala rotatoria	9
2.3 Estructura y funcionalidad	12
2.3.1 Principio de funcionamiento.....	12
2.3.2 Chasis	15
2.3.3 Propelas o hélices.....	15
2.3.4 Motores.....	15
2.3.5 Controladores electrónicos de velocidad (ESC)	17
2.3.6 Controlador de vuelo	18
2.3.7 Baterías	19
2.3.8 Radio control	19
2.3.9 Sensores y sistemas adicionales.....	20
2.4 Modo de operación.....	23
2.5 Aplicación de los drones en la vida civil	24
2.5.1 Búsqueda y rescate	24

2.5.2	Protección del medio ambiente.....	24
2.5.3	Envío y entrega.....	24
2.5.4	Exploración del espacio.....	25
2.5.5	Estudio de ambientes marinos.....	25
2.5.6	Agricultura.....	25
2.6	Agricultura 4.0.....	26
2.7	Mercado de los drones	27
2.8	Código abierto.....	27
2.9	Estado del arte	29
MATERIALES Y MÉTODOS		34
3.1	Lugar de la investigación.....	34
3.2	Materiales	34
3.2.1	BeagleBone Blue	34
3.2.2	Chasis S500.....	36
3.2.3	Motores MultiStar 2212 de 920 KV.....	37
3.2.4	Hélices 9450	38
3.2.5	Controladores eléctricos de velocidad (ESCs) MultiStar 32Bit 30A	39
3.2.6	Batería Li-Po Turnigy 5000 mAh 3s	40
3.2.7	Cargador de equilibrio de batería AC/DC con fuente de alimentación, Hobbyking ECO SIX 80W 6A 2~6S.....	41
3.2.8	Sensor LIDAR TFmini-S	42
3.2.9	JST SH Jumper	43
3.2.10	GPS-RTK2 con el módulo ZED-F9P-02B-00.....	44
3.2.11	Digi XBee SX 868.....	44
3.2.12	Módulo GPS UBX M10050.....	46
3.2.13	Antena Taoglas Magma AA.171 y antena multibanda AS-ANT2B-SUR-L1L2-25SMA-0046	
3.2.14	Protecciones de las hélices	47
3.2.15	Magnetómetro HMC5883L	48
3.2.16	Radiocontrol Turnigy 2.4G de 9 canales.....	49
3.2.17	Receptor Turnigy modificado para comunicación mediante señal PPM con la placa BBBlue	50
3.2.18	Módulo de desarrollo TTGO con ESP32 y display	52
3.2.19	LEDs	53
3.2.20	Imagen Debían habilitada para BeagleBone Blue	53

3.2.21	ArduPilot	54
3.2.22	Mission Planner.....	55
3.2.23	Balena Etcher	56
3.2.24	Tarjeta microSD de 16 GB	56
3.2.25	Computadora portátil HP Pavilion	57
3.2.26	MATLAB.....	57
3.3	Métodos.....	57
3.3.1	Instalación del software	58
3.3.2	Construcción de todos los sistemas	58
3.3.3	Calibración de ganancias y pruebas de vuelo	71
RESULTADOS		77
4.1	Prueba de vuelo para la calibración de las variables roll, pitch y yaw.....	77
4.2	Prueba de vuelo para la calibración de ganancia P y el parámetro THR_DZ en el control de altitud.....	82
4.3	Prueba de vuelo para la calibración de las ganancias P de la posición en X y Y del dron y PID de la velocidad en X y Y.....	86
4.4	Prueba de un vuelo automático con una misión de dos puntos de control.....	90
4.5	Prueba para realizar un vuelo automático con 9 puntos de control.....	92
4.6	Prueba para comprobar el funcionamiento del sistema de corrección RTK.....	95
4.7	Prueba final de un vuelo automático del dron con 9 puntos de control en los que tiene que realizar acciones específicas.....	100
4.8	Evaluación de la precisión del dron en los aterrizajes con la corrección RTK.....	103
CONCLUSIONES.....		105
REFERENCIAS.....		108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Clasificación de los VANT's.....	8
Figura 2.2 Diferentes tipos de multirrotores.	10
Figura 2.3 Arreglos para un cuadricóptero.	11
Figura 2.4 Movimientos de desplazamiento de un cuadricoptero.	13
Figura 2.5 Resultante del movimiento horizontal.....	13
Figura 2.6 Conexión de bobinado en un motor brushless.	17
Figura 2.7 Modulación del ancho de pulso PWM.	18
Figura 2.8 Funcionamiento de la corrección RTK.....	23
Figura 3.1 Diagrama pinout de la placa BeagleBone Blue.	36
Figura 3.2 Chasis Dron S500.....	37
Figura 3.3 Motor MultiStar 2212 de 920 Kv.....	38
Figura 3.4 Hélices 9450 bipalas auto bloqueables.	39
Figura 3.5 Controladores eléctricos de velocidad MultiStar 32Bit 30A.	40
Figura 3.6 Batería LiPo Turnigy 5000mAh 3S 11.1V	41
Figura 3.7 Hobbyking ECO SIX 80W 6A 2~6S Cargador de equilibrio de batería	42
Figura 3.8 Sensor LIDAR TFmini-S	43
Figura 3.9 JST SH Jumper 6 pines	43
Figura 3.10 GPS-RTK2 con el módulo ZED-F9P-02B-00.....	44
Figura 3.11 Kit Digi XBee SX 868.	45
Figura 3.12 Antena Taoglas Magma AA.171	47
Figura 3.13 Protectores de Helices Dji Phantom 3.....	48
Figura 3.14 Módulo magnetómetro 3-ejes HMC5883L.	49
Figura 3.15 Radio Control Remoto 2.4ghz Turnigy 9x.....	50
Figura 3.16 Receptor Turnigy modificado para comunicación mediante señal PPM.	51
Figura 3.17 Arduino Mini Pro	52
Figura 3.18 módulo de desarrollo TTGO ESP32 con display 1.14P, USB TIPO C, WIFI 4MB.	52
Figura 3.19 LED Diodo emisor de luz.....	53
Figura 3.20 Compartimento en el dron para la batería Lipo.....	59
Figura 3.21 Conexiones TX-60 y JST-XH para la alimentación del dron.	60

Figura 3.22 Descripción de las conexiones en los ESC's.	60
Figura 3.23 Sentido de giro de los cuatro motores para tener un drone en configuración de X.	61
Figura 3.24 Identificación del sentido de giro en las hélices.	62
Figura 3.25 Módulo HMC5883L instalado en el frame.	63
Figura 3.26 Protección del barómetro integrado en la placa BBBlue.	64
Figura 3.27 Sensor LIDAR TFmini-S montado en la parte inferior del drone.	65
Figura 3.28 Modulo GPS UBX M10050 instalado en el frame.	65
Figura 3.29 Bases construidas para evitar las vibraciones en la placa BBBlue.	66
Figura 3.30 Descripción de las conexiones en la placa BeagleBone Blue.	67
Figura 3.31 Adaptación del receptor a señal PPM.	68
Figura 3.32 Configuración de los canales del radio control.	68
Figura 3.33 Sistema de corrección RTK en la fase de pruebas.	69
Figura 3.34 Montaje de todos los módulos de la estación base RTK.	70
Figura 3.35 Estación base RTK.	70
Figura 3.36 Estación móvil RTK (rover) instalada en el drone.	70
Figura 3.37 Caja de protección para la placa BBBlue.	71
Figura 3.38 Protecciones de las hélices.	71
Figura 3.39 Diagrama de control altura PID del piloto automático ArduPilot.	72
Figura 3.40 Diagrama de explicación de los datos del control de altura.	73
Figura 3.41 Coordenadas de cada punto de la misión final.	76
Figura 4.1 Gráfica de Roll deseado y Roll obtenido, después de la calibración de las ganancias PID. ..	79
Figura 4.2 Gráfica de Pitch deseado y Pitch obtenido, después de la calibración de las ganancias PID.	80
Figura 4.3 Gráfica del Yaw deseado y el Yaw obtenido, después de la calibración de las ganancias PID.	81
Figura 4.4 Gráfica de los datos del vuelo de prueba para mantener la altitud, antes de la calibración de la ganancia P y el parámetro THR_DZ en el mantenimiento de la altitud.	82
Figura 4.5 Gráfica de los datos del vuelo de prueba para mantener la altitud, después de la calibración de la ganancia P y el parámetro THR_DZ en el mantenimiento de la altitud.	85
Figura 4.6 Gráficas de los datos obtenidos en un vuelo de prueba para mantener la posición en X y Y, antes de la calibración de la ganancia P de la posición en X y Y del drone y PID de la velocidad en X y Y.	87
Figura 4.7 Gráficas de los datos obtenidos en un vuelo de prueba para mantener la posición en X y Y, después de la calibración de la ganancia P de la posición en X y Y del drone y PID de la velocidad en X y Y.	89

Figura 4.8 Gráfica de los datos del primer vuelo de prueba en modo automático con dos puntos de control.....	91
Figura 4.9 Misión de dos puntos de control.	92
Figura 4.10 Gráficas de los datos del vuelo de prueba en modo automático con 9 puntos de control.	94
Figura 4.11 Visualización de la misión con 9 puntos de control, reteniendo la misma altura.	95
Figura 4.12 Acondicionamiento de la antena del rover para las pruebas de precisión.....	96
Figura 4.13 Resultados de la prueba de verificación de precisión del sistema de corrección RTK.	97
Figura 4.14 Visualización 3D de la prueba de verificación de la precisión del sistema de corrección RTK.	97
Figura 4.15 Gráficas de los datos de latitud y longitud, al estar recogiendo los datos del primer punto para misión descrita en el apartado 4.7.	99
Figura 4.16 Datos del vuelo de prueba en modo automático aterrizando en nueve puntos específicos determinados como muestra para evaluar la precisión del dron en los aterrizajes.	101
Figura 4.17 Misión aterrizando en nueve puntos específicos determinados como muestra para evaluar la precisión del dron en los aterrizajes	102
Figura 4.18 Representación 3D de los datos de la misión aterrizando en nueve puntos específicos determinados como muestra para evaluar la precisión del dron en los aterrizajes	102
Figura 4.19 Precisión del dron en los aterrizajes, indicada por el sistema de corrección RTK	104

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1 Valores de las ganancias PID del control en las variables roll, pitch y yaw, antes y después de la calibración.	78
Cuadro4.2 Representación del valor de Mode con respecto a los modos de vuelo.	84

RESUMEN

En los últimos años, se ha apreciado cada vez más el uso de los drones en la agricultura. Gracias a la tecnología que poseen, ahora es posible identificar varios parámetros como el Índice Vegetativo de Diferencia Normalizada (NDVI), estimación de nitrógeno, evapotranspiración diaria, estrés hídrico, rendimiento de los cultivos, entre otros. A pesar de los evidentes beneficios, el empleo de drones para actividades agrícolas en México es muy limitado debido principalmente al elevado costo que representa la adquisición de un dron profesional y a la mano de obra calificada para operarlo.

Este trabajo evidenció que es posible construir un dron de código abierto, automático y con una precisión menor a 10 cm, dedicado a las tareas de recolección de datos de los terrenos agrícolas. Para la construcción del dron se utilizaron plataformas hardware de arquitectura abierta y software de código abierto.

Para lograr la precisión menor a 10 cm en el plano, se construyó un sistema de corrección RTK (*Real Time Kinematics*) el cual consta de una estación base y una estación móvil (rover). Los resultados de las pruebas iniciales indican que estando el rover en movimiento, el sistema alcanzó una precisión de 2.3 centímetros, aunque ocasionalmente perdía la señal debido a obstáculos como edificios y maquinaria. Sin embargo, cuando no hay obstáculos y el rover está estático, la precisión mejora a menos de 1 centímetro. Al integrar el sistema en el dron y evaluar su precisión en una muestra de nueve aterrizajes autónomos, se obtuvo un error promedio de 8 centímetros.

El dron actualmente puede realizar misiones automáticas, que pueden ser de gran utilidad en trabajos para la agricultura de precisión. Pero la funcionalidad del dron no solo se limita a las misiones ya realizadas, si no que se pueden generar misiones de acuerdo a necesidades específicas. Además al ser totalmente de código abierto se le puede añadir diferente instrumentación, para poder realizar tareas específicas de apoyo en la gestión de los cultivos.

Palabras clave: Dron automático, Corrección RTK, Código abierto, Agricultura de precisión.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El origen de lo que hoy se conoce como dron, término utilizado coloquialmente para definir al vehículo aéreo no tripulado (VANT), UAV por sus siglas en inglés (*Unmanned Aerial Vehicle*), más propiamente definido como RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), se remonta a los inicios de la aviación tripulada. Para mejorar los bosquejos iniciales de aviones y aeronaves, fue necesario construir prototipos a escala, a fin de poder adquirir la información necesaria para experimentar y evaluar los principios de la aerodinámica, evitando arriesgar las vidas de los pilotos. El primer vuelo de una aeronave no tripulada se dio hasta la época de la Primera Guerra Mundial (Rejado *et al.*, 2016).

Al principio se usaban como simples objetos de entrenamiento ya que la tecnología de ese momento no permitía que fueran tan precisos. Después, con la incorporación de cámaras, se usaron para espionaje y hoy muchos son usados como armas letales utilizadas en ataques selectivos con alta precisión, lo que la ha convertido en la herramienta favorita del ejército de numerosos países. Actualmente se estima que el 85% de la tecnología de drones es utilizada para fines militares, restando un 15% para aplicaciones civiles, destacando la fotografía, transporte de paquetes entre otros, (Puri, 2017). Debido a las importantes ventajas que ofrecen estos dispositivos, evidentemente existe un gran interés en impulsar el desarrollo de más aplicaciones civiles. Su potencial puede demostrarse en áreas entre las que se encuentran: monitoreo de lugares de difícil acceso, observación de incendios forestales, búsqueda y rescate, cartografía, entrega de paquetería y cuidado de grandes campos.

En los últimos años, se ha apreciado cada vez más el uso de los drones en la agricultura. Gracias a la tecnología que poseen, ahora es posible identificar varios parámetros como el Índice Vegetativo de Diferencia Normalizada (NDVI), estimación de nitrógeno, evapotranspiración diaria, estrés hídrico, rendimiento de los cultivos, entre otros. Con lo cual brindan información adecuada para ayudar a cuantificar y decidir sobre el momento y el lugar del riego, siembra, fertilización y cosecha (Amarillo *et al.*, 2015).

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Antecedentes

La transición del estilo de vida nómada a uno sedentario marcó un cambio fundamental en la humanidad, permitió a las sociedades humanas comenzar a practicar la agricultura de manera más intensiva. Lo que a su vez aumentó la disponibilidad de alimentos y permitió un crecimiento de la población más sostenible. Su desarrollo transformó las civilizaciones, así como su entorno (González *et al.*, 2016).

En un mundo en constante crecimiento y con una población cada vez más numerosa, de acuerdo a la ONU (2022) la población mundial alcanzó el 15 de noviembre de 2022 los 8,000 millones de personas. Se calcula que en 2030 será de 8,500 millones y para 2050 de 9,700 millones de personas. Estas tendencias significan que la demanda comercial de alimentos seguirá creciendo. Las proyecciones muestran que para alimentar a una población mundial de 9,700 millones de personas en 2050 sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70%. Este crecimiento impone el desafío para la producción de alimentos, aunado al fomento del crecimiento socioeconómico, la adopción de sistemas productivos sostenibles y los esfuerzos para frenar el cambio climático. Debido a esto la producción de alimentos tendrá que volverse más eficiente y sostenible (Rodolfo, 2021). Por lo cual, se está en la búsqueda de tecnologías modernas que ayuden a mitigar la falta de atención de ciertas

particularidades de los cultivos, las cuales generan gastos innecesarios en el monitoreo y gestión de estos (Deepak, 2018).

Según la International Society of Precisión Agriculture (ISPA, 2021) la agricultura de precisión, es una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola.

La agricultura de precisión se basa en el uso de tecnologías avanzadas, como sensores remotos, sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG) y análisis de datos, entre otros. Los drones como una herramienta de la agricultura de precisión, son de gran utilidad ya que estas pequeñas aeronaves equipadas con cámaras y sensores pueden recolectar datos e imágenes de alta resolución sobre los cultivos y terrenos de manera rápida y eficiente. Además de no tener ningún contacto tangible con el cultivo. Pueden realizar aplicaciones precisas de productos químicos o agua. También pueden efectuar el trabajo de siembra de una plantación por al voleo de una manera mucho más rápida y precisa (González *et al.*, 2015).

1.1.2 Formulación del problema

A pesar de los evidentes beneficios, el empleo de drones para actividades agrícolas en México es muy limitado debido principalmente al elevado costo que representa la adquisición de un dron profesional. Aunado a esto se requiere un vehículo aéreo para cada actividad en específico, pues fueron diseñados meticulosamente para cumplir con la función que se les programó. Intentar cambiar el propósito para el cual fueron creados resulta muy difícil debido a que se requiere conocimientos técnicos avanzados en electrónica, programación, mecánica, aerodinámica, control y aeronáutica. Además poseen un software de código cerrado distribuido por licencia de uso, lo cual implica que el código fuente no se encuentra

disponible para cualquier usuario, es decir no se hace público, por lo tanto no hay forma de que los usuarios modifiquen la fuente del código.

1.2 Justificación

Existe una comunidad de código abierto (*Open Source*), la cual brinda acceso libre y costeable a plataformas de software y hardware para construir un dron de cualquier dimensión y funcionalidad. Varias plataformas hardware de arquitectura abierta y software de código abierto han sido desarrolladas por comunidades y proyectos de investigación, para probar nuevas aplicaciones de los drones e implementarlas en varias actividades de la vida cotidiana. El conocimiento adquirido en el desarrollo de estas plataformas ha sido publicado bajo el término de código libre, por lo cual está disponible para todo el que lo quiera usar y modificar.

Construir un dron de arquitectura abierta y código abierto, no solo es una alternativa asequible, sino que también brinda la oportunidad de aprender y experimentar con la tecnología. Además se contribuye a la comunidad de código abierto, pero sobre todo se promueve la innovación y la educación. El hecho de poder elegir las piezas que formarán parte de la aeronave, brinda una versatilidad al poder instrumentarlo con los sensores y sistemas deseados para cumplir uno o varios objetivos en particular. Por ejemplo se puede hacer un dron automático al incorporarle un controlador de vuelo con la capacidad de ejecutar un plan de vuelo previamente programado. También se pueden añadir cámaras para la obtención de fotografías o video, así como actuadores que permitan sujetar un objeto para transportarlo de un lugar a otro. Contar con un dron de código abierto, automático y con precisión centimétrica, brinda la posibilidad de dedicarlo a las tareas de recolección de datos del cultivo y de los terrenos agrícolas, asegurando menor costo de adquisición a los productores, así como una versatilidad de uso en diversas actividades. Por otra parte, en el área de investigación se puede tener un prototipo base para poder experimentar con diferentes sensores y funcionalidades, hasta poder llegar a diseñar nuevos modelos de aeronaves no existentes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Construir un dron de código abierto, automático, capaz de realizar misiones con los siguientes eventos: aterrizar en puntos específicos con precisión menor a 10 cm, permanecer ahí un tiempo indicado y continuar con la ruta establecida. Para uso en tareas de agricultura de precisión.

1.3.2 Objetivos específicos

- Instalar el firmware de ArduPilot en la placa de control BeagleBone Blue (Beagleboard.org, 2023), siguiendo las instrucciones de [ArduPilot Wiki 57](#) (ArduPilot Dev Team, 2023), para tener el sistema que se encargará del control automático del dron. Además de utilizar el software Mission Planner como una estación de control en tierra, lo que permitirá establecer comunicación telemétrica con el dron.
- Armar el dron empezando por el chasis, para tener una base donde integrar los motores, las propelas, los controladores eléctricos de velocidad (ESC's), la placa de distribución y el controlador de vuelo. Asegurando que el dron tenga lo mínimo necesario para poder volar.
- Instrumentar al dron con los sensores particulares que serán necesarios para la aplicación del proyecto.
- Adaptar un radio control antiguo, para poder tener una comunicación mediante el protocolo PPM (*Pulse Position Modulation*) y así controlar los movimientos deseados del dron en la fase de pruebas y sintonización de las ganancias de control, además para poder retomar el control manual de la aeronave en caso de una falla durante un vuelo automático.

- Optimizar el control del dron, realizando la calibración de las ganancias PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que estabilizan los ángulos de alabeo, cabeceo y guiñada. Así mismo ajustar la ganancia P para controlar la altitud, y calibrar las ganancias de posición y velocidad en los ejes X y Y, lo que garantizara un control preciso de la ubicación y rumbo en los vuelos de prueba.
- Construir una estación base de corrección RTK (*Real-Time Kinematics*) así como un receptor móvil (rover), para integrarlo al dron, lo que proporcionara precisión menor a 10 cm en su ubicación. También realizar rutas automáticas con aterrizajes específicos, para evaluar la precisión del aterrizaje del dron utilizando la corrección RTK.

1.4 Hipótesis

Es posible construir un dron automático utilizando hardware de arquitectura abierta y software de código libre, capaz de realizar misiones con los siguientes eventos; aterrizar en puntos específicos con una precisión menor a 10 cm, permanecer ahí un tiempo indicado y continuar con la ruta establecida, para uso en tareas de agricultura de precisión.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Definición de dron.

La palabra en inglés “drone” se adoptó para denominar a estas aeronaves, haciendo referencia a las abejas o zánganos. Puesto que el sonido producido por el giro de las hélices, presenta cierta similitud al sonido de un zángano volando (Escudier, Atkins, 2019).

Como ya se mencionó anteriormente, varios autores utilizan la palabra RPAS (Umiles Group, 2022) para referirse a estas aeronaves así como también VANTs (Ahir *et al.*, 2019). Sin embargo, en la presente investigación se usan las diferentes definiciones indistintamente, ya que según la literatura revisada no existe una aplicación estricta de estas definiciones a estos artefactos. No obstante se tiende a utilizar la palabra dron ya que es el término coloquial más utilizado.

2.2 Clasificación de los drones

Resulta bastante complejo establecer una clasificación precisa para este tipo de aparatos voladores. Sin embargo, se pueden agrupar de manera bastante general en dos grandes grupos según su aplicación: los de uso militar y los de uso civil (Cuerno Rejado *et al.*, 2016). Por otro lado, dentro de cada grupo se pueden mostrar subcategorías: respondiendo a diversas características específicas como su diseño, forma, peso, o tamaño. Varios autores como (Santana, 2017) y (Oñate, 2015), indican que existen dos grandes categorías principales: los aerostatos y los aerodinos. Los primeros necesitan gas para sustentarse, como los dirigibles o los globos. Mientras que los aerodinos necesitan propulsión para elevarse, ya que son más pesados que el

aire. A continuación en la Figura 2.1, se muestra una clasificación según sus características de sustentación que se emplean para el vuelo.

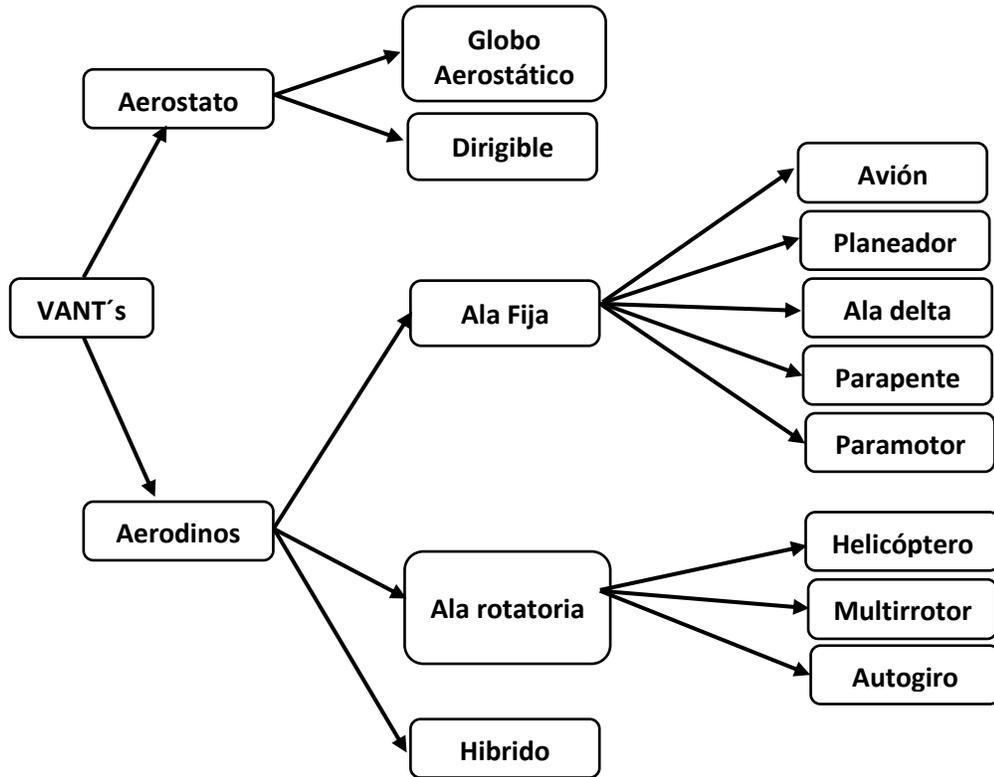


Figura 2.1 Clasificación de los VANT's. (Santana, 2017).

Debido al tipo de sustentación, los aerodinos son los tipos de drones más populares ya que tienen diversas aplicaciones, son utilizados en campos como la fotografía aérea, la vigilancia, la agricultura de precisión y más. El hecho de que puedan generar sustentación por sus propios medios aerodinámicos, les permite una alta maniobrabilidad por lo que pueden cambiar de dirección rápidamente, además de tener una mayor capacidad de carga útil. Por lo tanto es más factible construir un prototipo sustentado por sus propios medios aerodinámicos que un aerostato. Por lo que a continuación se hace referencia únicamente a los aerodinos.

2.2.1 Drones híbridos

Los drones híbridos cuentan con versatilidad en el despegue y aterrizaje, ya sea en vertical, característica propia de los helicópteros, o en horizontal como lo hacen los aviones. Debido a esta funcionalidad estas aeronaves pueden realizar misiones con necesidades específicas (Inceptive, 2022).

2.2.2 Drones de ala fija.

Los sistemas de ala fija, son como los aviones tradicionales con alas en forma de cruz. Debido a que son más ligeros y tienen mayor autonomía, pueden volar a mayores distancias, pero necesitan siempre estar en movimiento. Además, son más silenciosos, lo que los hace muy útiles en labores de vigilancia así como en la toma de fotografías de grandes extensiones agrícolas (Carrillo *et al.*, 2017).

2.2.3 Drones de ala rotatoria

Los drones de ala rotatoria cuentan con uno o más rotores que le proporcionan control durante el vuelo, tienen mayor maniobrabilidad logrando moverse linealmente sobre los ejes X,Y y Z, ejecutar guiñada, y cualquier combinación de los movimientos anteriormente mencionados. Su funcionalidad le permite volar mucho más cerca de estructuras y edificios (Rennie, 2016).

2.2.3.1 Multirrotores

Actualmente, se considera que un multirrotor es un tipo de aeronave que tiene más de dos rotores para impulsarse. Al principio se mantuvieron los cuatro rotores básicos, pero varias empresas fueron desarrollando modelos innovadores que ahora pueden alcanzar los 18 rotores. Por tanto, se pueden levantar cargas más pesadas y controlarlas con precisión. Estos sistemas de drones con tres, cuatro, seis, u ocho rotores toman sus nombres a manera de tricóptero, quadricóptero, hexacóptero u

optocóptero, respectivamente (Wales, 2023). La Figura 2.2 muestra ejemplos de los diferentes tipos de multirrotores.

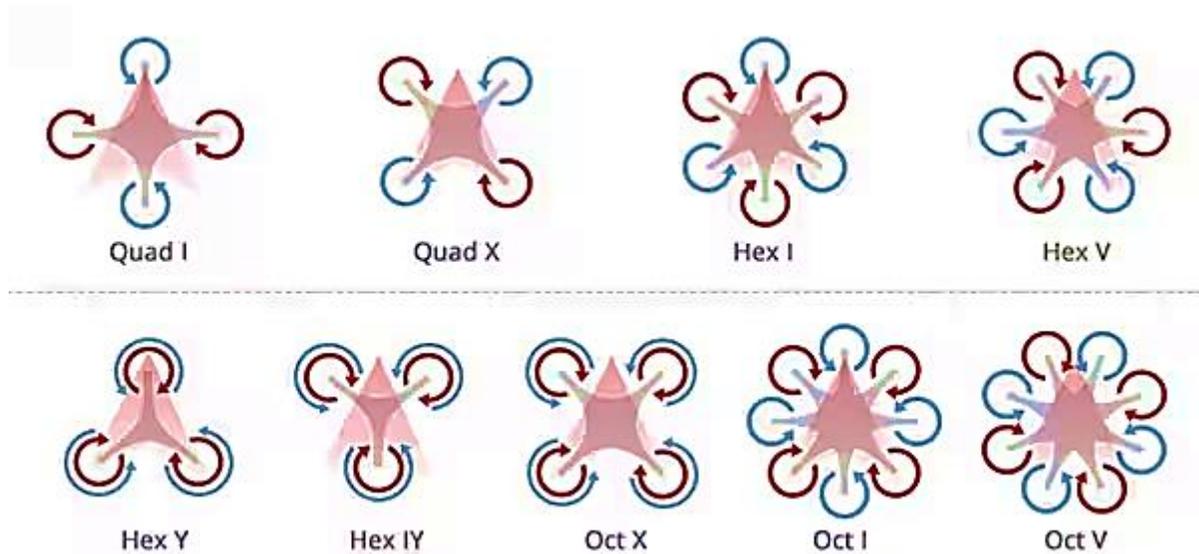


Figura 2.2 Diferentes tipos de multirrotores. (Max Wales, 2023).

El tipo de multirrotor que más se utiliza para la construcción de drones es el cuadricóptero, debido a que es relativamente simple en términos de diseño y mecánica en comparación con aeronaves con mayor número de motores. Además, su configuración de cuatro motores proporciona una mayor estabilidad durante el vuelo, lo que facilita su control, especialmente para usuarios novatos. Los cuadricópteros son altamente maniobrables y pueden realizar giros y movimientos precisos, lo que los hace ideales para aplicaciones como la fotografía y grabación aérea, así como para la investigación y desarrollo en diferentes áreas. Por estas razones la presente investigación se enfoca en la construcción de un cuadricóptero, por lo que a continuación se describirá solo el funcionamiento de este tipo de multirrotor.

2.2.3.2 Movimientos de un cuadricóptero

La variación de la velocidad de giro de cada rotor produce un control sobre el movimiento del multirrotor al ser modificadas las fuerzas de empuje. Generalmente se utilizan hélices de paso fijo con ángulos de ataque constantes durante toda la rotación. En consecuencia, para tener un vuelo rotatorio vertical exitoso y controlado, es necesario reducir los efectos secundarios asociados al momento generado por la resistencia del aire a la forma de la hélice. La metodología más antigua basa su funcionamiento en la colocación de dos hélices coaxialmente opuestas, lo que hace que la disposición sea compleja. Sin embargo para el caso de un multirrotor simple, usar pares de hélices que giran en diferentes direcciones es más sencillo. En el caso particular de un cuadricóptero se necesitan de dos hélices girando en sentido horario y dos hélices en sentido anti horario. Además, como se puede observar en la Figura 2.3 existen dos arreglos en particular para un cuadricóptero.

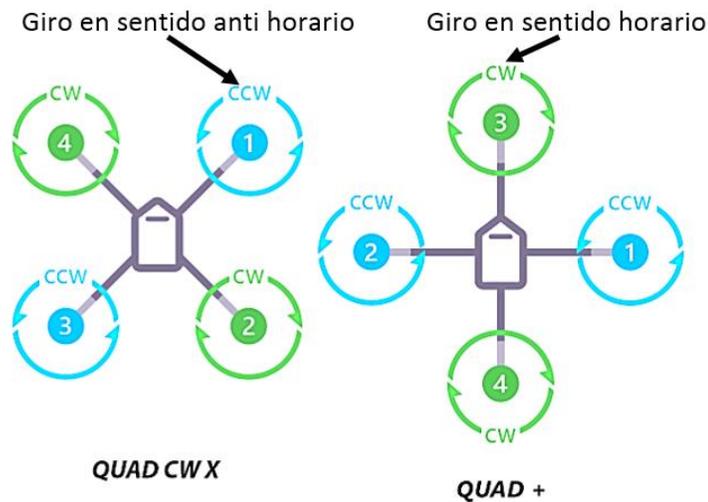


Figura 2.3 Arreglos para un cuadricóptero. (ArduPilot Dev Team, 2023).

2.3 Estructura y funcionalidad

2.3.1 Principio de funcionamiento

Un cuadricóptero es un vehículo dinámico accionado con cuatro fuerzas de entrada, una para cada rotor, y seis grados de libertad. Los grados de libertad (DOF, *Degree Of Freedom*) son los parámetros que determinan el estado de un sistema mecánico. En el contexto de un cuadricóptero, se refiere a las maneras en las que el dron puede moverse en el espacio tridimensional. Un cuadricóptero puede moverse en el espacio tridimensional mediante cinco movimientos fundamentales. Su funcionamiento se logra al variar la velocidad de rotación de varios rotores para cambiar la dirección de la aeronave mediante el impulso generado, como lo muestra la Figura 2.4.

- Cambio de orientación en Alabeo (Roll): este se genera disminuyendo la velocidad de los dos rotores de los laterales, permitiendo que el dron gire sobre su eje longitudinal.
- Cambio de orientación en Cabeceo (Pitch): se logra disminuyendo la velocidad de los dos rotores frontales o posteriores, haciendo que el dron tenga una inclinación sobre su eje lateral.
- Cambio de orientación en Guiñada (Yaw): para lograr este movimiento se requiere que dos de los rotores que giran en el mismo sentido disminuyan su velocidad, originando que el dron gire sobre su propio eje normal.
- Movimiento vertical: este movimiento requiere que todos los motores brinden un empuje igual, el mismo que debe ser mayor al peso total del dron.
- Movimiento horizontal: para lograr el movimiento en el plano (X,Y), los ángulos de alabeo y cabeceo dividen el empuje en dos direcciones generando un movimiento lineal. Al disminuir la velocidad del motor en cuya dirección se pretende mover, y aumentando la velocidad del motor en el lado opuesto, se genera un desequilibrio. Este desequilibrio hará que el dron se incline hacia un lado y la componente horizontal de la fuerza de empuje impartirá un movimiento horizontal al dron, como se puede ver en la Figura 2.5.

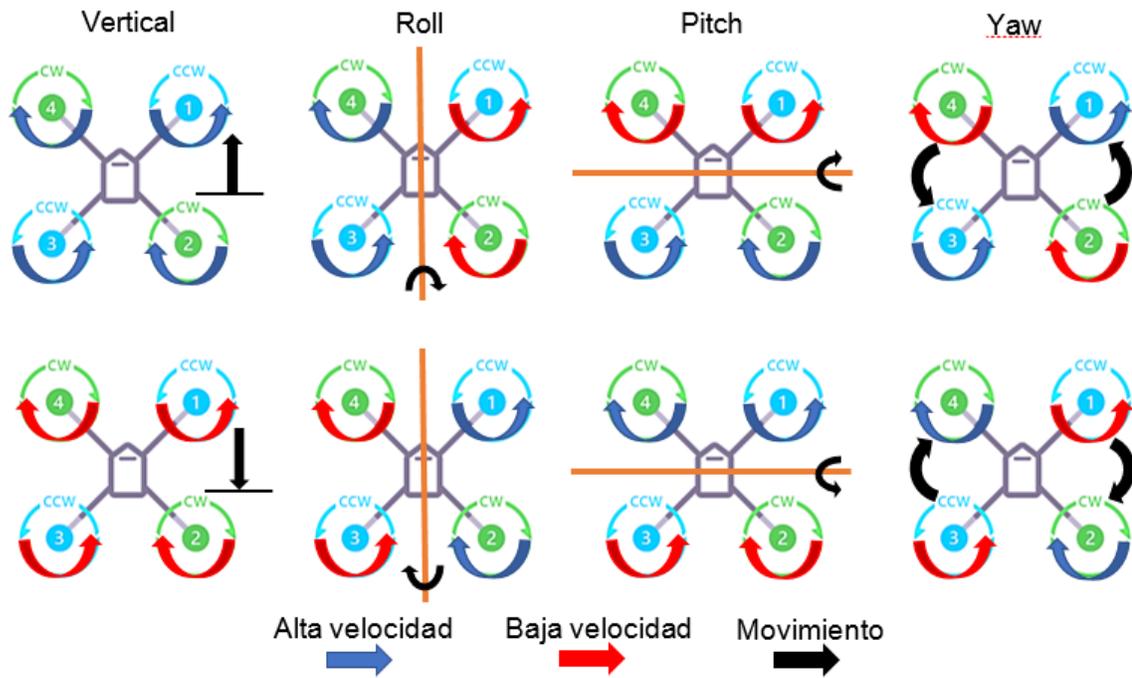


Figura 2.4 Movimientos de desplazamiento de un cuadricóptero (Autor).

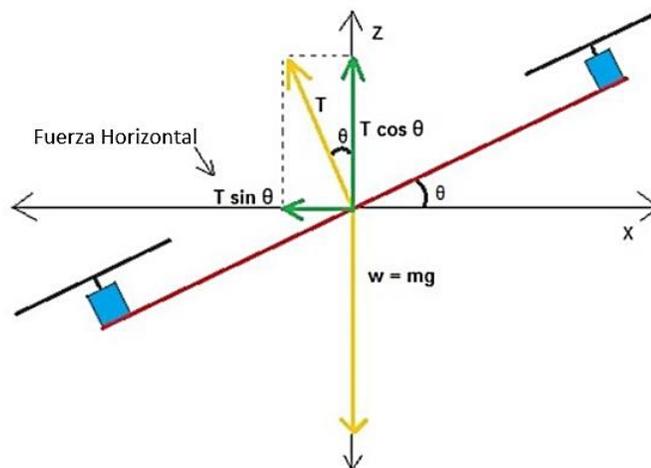


Figura 2.5 Resultante del movimiento horizontal (Tahir et al., 2016).

2.3.1.1 Representación en espacio de estados

El espacio de estados es una representación matemática utilizada en ingeniería para modelar y analizar sistemas dinámicos. En esta representación, el estado de un sistema se describe mediante un vector de estado, que incluye todas las variables necesarias para capturar el comportamiento del sistema en un momento dado. Para un cuadricóptero, el espacio de estados puede incluir variables como la posición, la orientación y las velocidades de rotación. En un dron con seis grados de libertad, el espacio de estados se puede describir mediante un conjunto de ecuaciones que representan su dinámica (Tahir *et al.*, 2016). Estas ecuaciones utilizan un vector de estado que incluye las siguientes variables:

1. Posición (traslaciones):
 - x (posición en el eje X)
 - y (posición en el eje Y)
 - z (posición en el eje Z)

2. Velocidades lineales:
 - \dot{x} (velocidad en el eje X)
 - \dot{y} (velocidad en el eje Y)
 - \dot{z} (velocidad en el eje Z)

3. Ángulos de orientación (rotacionales):
 - ϕ (roll, inclinación lateral)
 - θ (pitch, inclinación adelante/atrás)
 - ψ (yaw, rotación alrededor del eje vertical)

4. Velocidades angulares
 - $\dot{\phi}$ (velocidad de roll)
 - $\dot{\theta}$ (velocidad de pitch)
 - $\dot{\psi}$ (velocidad de yaw)

Por lo tanto, se obtiene el vector de estado de la siguiente manera:

$$q^T = [x \ y \ z \ x' \ y' \ z' \ \phi \ \theta \ \psi \ \phi' \ \theta' \ \psi']$$

Para que estos movimientos sean producidos, se necesitan de varios elementos, desde los motores que propulsan el vuelo hasta los sistemas de navegación y control que permiten su operación precisa, cada elemento desempeña un papel crucial en la funcionalidad y el rendimiento del dron. A continuación se describe cada uno de los componentes esenciales para lograr un vuelo estable, seguro y efectivo.

2.3.2 Chasis

El chasis es la parte esquelética del dron donde todos los componentes se fijan. El diseño o la elección del chasis es fundamental, pues dependiendo del largo de los brazos del chasis se pueden utilizar hélices más grandes o más pequeñas brindando mayor o menor propulsión, la cual tiene que ser más grande respecto al peso teórico a levantar. Usualmente recibe el nombre de marco ó chasis (Pulecio, 2018).

2.3.3 Propelas o hélices

Las hélices son aspas o palas que funcionan como alas giratorias para generar propulsión. La sección transversal de las palas tiene un perfil aerodinámico que genera simultáneamente sustentación y arrastre. Como resultado del perfil curvo de la hélice este par de magnitudes se descomponen en: una fuerza de empuje y una fuerza opuesta al giro. Para elevarse el dron necesita el empuje producido por la hélice. Por otro lado, la fuerza opuesta al giro constituye el torque en sentido opuesto al giro del motor dándole impulso al dron (Morales, 2001).

2.3.4 Motores

Son los encargados de hacer rotar las hélices, se ubican en la parte final de cada uno de los ejes del chasis. Existen dos tipos de motores dedicados a los drones: con escobillas (brushed) y sin escobillas (brushless) (Pulecio, 2018). En general, un motor eléctrico está constituido por dos partes principales: el estator y el rotor. El estator es la parte estática del motor, el cual genera un campo magnético permanente. Por otro lado, el rotor es la parte móvil del motor y está formado por bobinas de alambre.

En los motores con escobillas, al suministrarle energía eléctrica a la parte móvil por medio de las escobillas, producen un campo magnético el cual entrelaza a las bobinas, este campo magnético de la bobina interactúa con el campo magnético del estator provocando que el rotor gire. Para lograr que el motor gire continuamente es necesario una conmutación en la polaridad del campo magnético del rotor, esta conmutación magnética se realiza de forma mecánica a través de un cilindro dividido en dos partes y unas escobillas conectadas a la batería.

Un motor sin escobillas, también conocido como brushless, opera mediante la interacción entre un estator fijo y un rotor móvil, utilizando un sistema de control electrónico avanzado. El estator es la parte fija del motor y es donde se colocan las bobinas enrolladas para generar el magnetismo. La Figura 2.6 muestra la manera en la que se conecta el bobinado, en este caso el estator está compuesto por doce bobinas, embobinadas de forma intercalada. A su vez estas bobinas están separadas en tres grupos de electroimanes, es decir cuatro bobinas se conectan para formar un electroimán. Para suministrar corriente eléctrica a los electroimanes se utiliza una conexión trifásica, la cual permite la activación de solo un electroimán a la vez. El rotor es la parte giratoria donde se coloca el eje y los imanes permanentes, normalmente está construida en forma de campana. En lugar de emplear escobillas para conmutar la corriente eléctrica en el estator, cuenta con un controlador electrónico que administra la energía suministrada a las bobinas del estator de manera secuencial y precisa. Este controlador electrónico ajusta la polaridad de las bobinas en relación con la polaridad del rotor, generando un campo magnético rotativo que impulsa el movimiento del rotor.

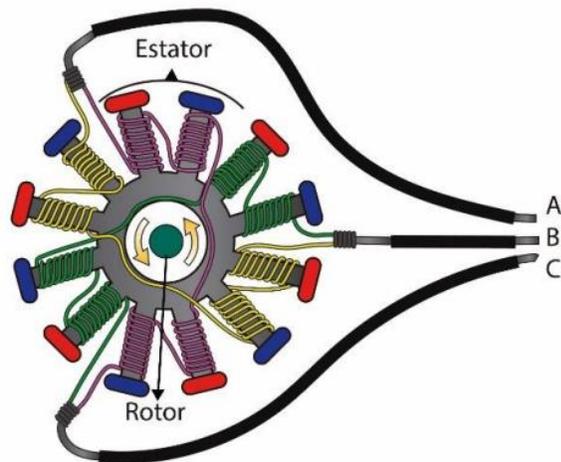


Figura 2.6 Conexión de bobinado en un motor brushless. (López Vicente et al., 2020).

2.3.5 Controladores electrónicos de velocidad (ESC)

Denominados ESC por sus siglas en inglés: *Electronic Speed Control*, es un circuito electrónico que hace posible que los motores sin escobillas giren de manera efectiva y a la velocidad especificada. Este controlador se conecta a cada una de las fases del motor, a la alimentación y al controlador de vuelo, siendo este último el que transmite una señal PWM (*Pulse Width Modulation*), la cual es utilizada como protocolo de comunicación entre el motor y el controlador de vuelo. Es decir, por medio de esta señal pulsante el controlador de vuelo envía los parámetros codificados de la velocidad de giro que debe alcanzar el motor (Gonzales, 2017), la Figura 2.7 muestra un ejemplo de esta codificación.

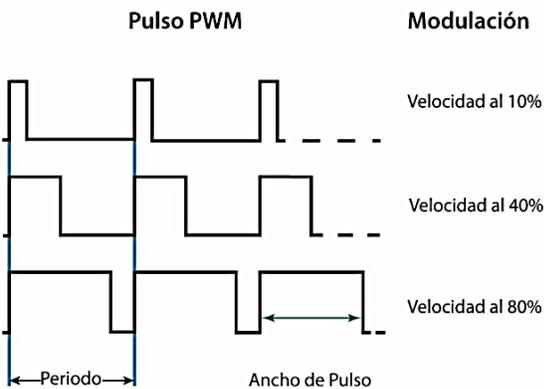


Figura 2.7 Modulación del ancho de pulso PWM. (Dávila et al, 2017).

2.3.6 Controlador de vuelo

Un controlador de vuelo, también conocido como FC por sus siglas en inglés *Flight Controller*, es un tipo de tarjeta electrónica vital para un VANT debido a que es el encargado de garantizar que todos los módulos de la aeronave funcionen juntos perfectamente. El procesador decodifica las señales que fueron captadas por el radio receptor o en su caso las instrucciones de la misión guardada en la memoria, cambiando la velocidad de los motores a través de los ESC's. Como resultado, el dron puede moverse según las preferencias del operador, por el espacio tridimensional de forma remota (Ebeid et al., 2018). Pueden ser de diferentes tamaños y disposiciones pero en términos generales contienen los siguientes módulos fundamentales:

- Acelerómetro: determina la aceleración de los movimientos realizados, aportando información para que los motores generen un equilibrio en la aeronave.
- Giroscopio: permite medir las aceleraciones en la orientación de roll, pitch y yaw.
- Magnetómetro: es un instrumento que le permite a la aeronave obtener información del rumbo, es decir, realiza la función de una brújula por lo que proporciona la dirección con respecto al norte magnético de la tierra.

- Barómetro: se utiliza para medir la presión atmosférica a la cual se encuentra la aeronave, esta variable disminuye con la altura por lo tanto permite una estimación de la altura real a la que se encuentra la aeronave.
- Microcontrolador: adquiere la información de los sensores y la procesa, envía la señal PWM a los ESC's, recibe las señales del receptor de radio, entre otras funciones.

2.3.7 Baterías

Para lograr el funcionamiento de todos elementos electrónicos que integran al dron es necesario contar con una fuente de energía. Las baterías más comunes usadas para proyectos de vehículos con alto rendimiento son conocidas como Lipo. Están constituidas por polímeros de litio, lo cual las dota de particularidades especiales como las altas tasas de carga y descarga, así como una gran capacidad de almacenamiento. Sin embargo, son bastante sensibles y pueden dañarse con facilidad, o incluso si no se usan adecuadamente pueden presentarse explosiones (Gonzales, 2017).

2.3.8 Radio control

Para pilotar estos vehículos se requiere un sistema de control mediante el cual sea posible controlar el VANT de forma remota desde tierra y en el caso de un vuelo automático, poder retomar el control del dron si se presenta alguna falla. Esto se logra gracias a un sistema de transmisor y receptor de señales en el rango de las ondas de radio. El transmisor es parecido a un control de juego portátil, cuenta con joysticks, interruptores y perillas, que interpreta las instrucciones del usuario y las transmite de manera inalámbrica al receptor. El receptor es el encargado de recibir las señales provenientes del transmisor, comunicando esta información al controlador de vuelo, que a la vez será quien regule la velocidad de los motores. En general se necesitan de cuatro canales para poder pilotear un VANT, a los cuales se les asigna el control de las variables roll, pitch, yaw y throttle. El throttle se refiere al control que ajusta la

velocidad de los motores, afectando la elevación del dron, al aumentar el throttle los motores giran más rápido, al reducir el throttle los motores giran más lento. Adicionalmente se tienen más canales para poder incluir diferentes modos de vuelo, así como activar actuadores externos a la propulsión del dron, por ejemplo pinzas sujetadoras o servomotores (Blando *et al.*, 2016).

2.3.9 Sensores y sistemas adicionales

2.3.9.1 Sensor LIDAR

La palabra LIDAR proviene de las siglas de *Laser Imaging Detection and Ranging*, es un sistema de medición y detección de objetos mediante láser. Consiste de manera general en un diodo emisor de haces láser infrarrojos y un sensor receptor de esos haces láser. En primera instancia, el diodo emite rayos láser que impactan sobre determinados objetos o el suelo y rebotan. Posteriormente, aquellos rayos que regresan reflejados son recibidos por un fototransistor o fotodiodo, que en conjunto con un microcontrolador miden el tiempo de ida y regreso de los pulsos de luz, para calcular la distancia con la fórmula: $\text{distancia} = (\text{velocidad de la luz} \times \text{tiempo transcurrido}) / 2$ (Naxi *et al.*, 2022).

Los sensores LIDAR pueden superar algunos inconvenientes de otros sensores, como el sonar y el radar, ya que proporcionan información sumamente precisa. Es por ello que tiene mucha adopción por parte de los usuarios, pues ayuda a obtener información de los objetos con mayor precisión y adicionalmente tienen un costo asequible (Ibañez, 2017).

La utilidad que tiene los LIDAR es muy versátil en diversos sectores, desde la conducción autónoma hasta las geociencias. Se puede hacer una clasificación de manera general en función de la plataforma en la que estén instalados (MathWorks, 2019).

- LIDAR aéreos.

Se encuentran montados en aeronaves tripuladas y VANTs. El láser se pulsa a través del aire, capturando datos de nubes de puntos de un espacio extenso, pueden ser utilizados para mapeo, extracción de características, identificación de terrenos y otros casos. Algunos ejemplos de aplicación son en la agricultura, planificación urbana, cartografía geológica, navegación aérea y planificación de rutas.

- **LIDAR terrestres**

Existen dos tipos, los móviles y estacionarios. Los estacionarios están montados sobre una plataforma estacionaria, son más adecuados para aplicaciones en las que se necesita capturar datos detallados y más próximos, por ejemplo en la arquitectura son utilizado para el monitoreo de infraestructuras, con lo cual es posible detectar pequeños cambios en el entorno, como las grietas. Los móviles, son colocados en una plataforma móvil, su aplicación más importante es la conducción autónoma de automóviles (Yellowscan, 2023).

- **LIDAR de interiores**

Por lo general están montados sobre robots móviles. El LIDAR es utilizado en aplicaciones de robótica de interiores para capturar información de profundidad del entorno que luego se procesa en función de los casos prácticos. Son usados usualmente para mapeo, detección y advertencia de colisión y evasión de obstáculos. Por ejemplo el iRobot Roomba es uno de los robots aspiradores más avanzados, con funciones como el mapeo inteligente, la identificación y evasión de obstáculos (Castillo, 2023).

2.3.9.2 Sistema de corrección RTK

El acrónimo RTK proviene de las siglas en inglés *Real Time Kinematics*. En términos generales es un sistema de posicionamiento y navegación con una precisión centimétrica. Su capacidad de alcanzar mayor exactitud que el GNSS estándar radica

en el empleo de dos receptores, uno usado como referencia fija el cual es conocido con el nombre de base, y otro móvil denominado rover (Takasu *et al.*, 2009).

De una manera simplificada, su funcionamiento es el siguiente: se sitúa un receptor (base) en un punto fijo donde se conoce con exactitud la posición y si no se conoce se realiza un survey (muestreo de la posición) para fijar sus coordenadas con la mayor precisión posible. Después se compara la posición deducida a partir de la información proporcionada por los satélites con la posición esperada y conocida. Al evaluar la diferencia entre las dos posiciones, es posible determinar las correcciones necesarias para convertir la posición observada en la real. Esta información es enviada a la estación móvil, la cual utiliza esa información para calcular el error.

En las cercanías de la ubicación entre la base y el rover los principales errores en el procesamiento de las señales RTK permanecen constantes, por este motivo presentan errores similares en el cálculo de su posición. Al tener conocimiento de la posición real de la base, se genera un diferencial que permite al rover eliminar esos errores constantes durante todo el procesamiento. Los errores que se incluyen en este principio son los del reloj de los satélites, los errores orbitales, el retardo ionosférico y el retardo troposférico (Güisso *et al.*, 2019).

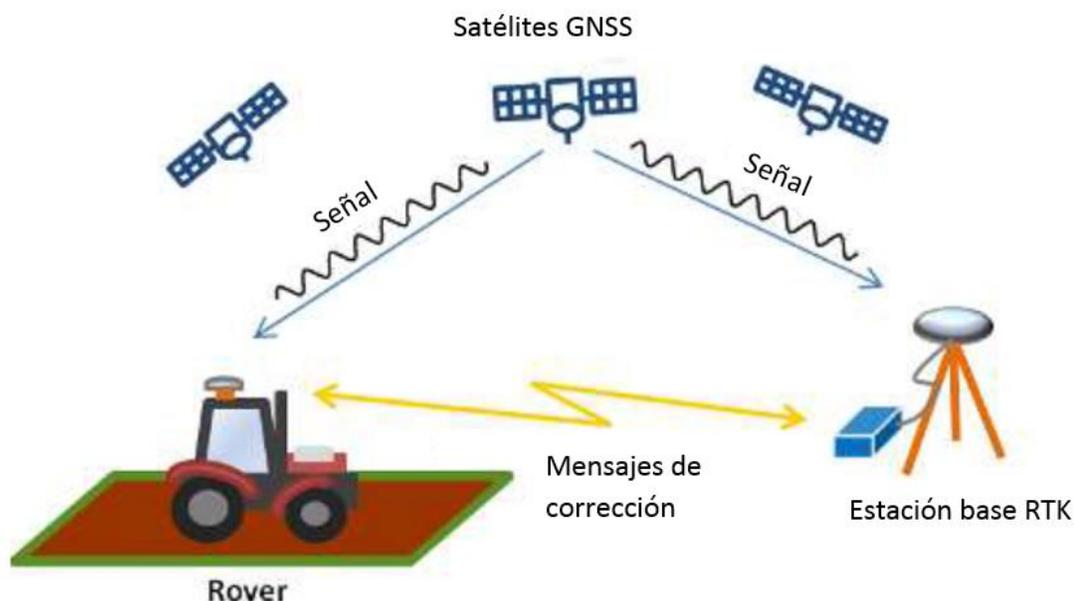


Figura 2.8 Funcionamiento de la corrección RTK. (Güisso et al., 2019)

La Figura 2.8 muestra el esquema de funcionamiento de un sistema de corrección RTK mediante el envío de mensajes de corrección entre la estación base y la estación móvil. Utilizando esta técnica es como se consigue una precisión de orden de centímetros, que comparado con el GNSS convencional es una mejora considerable (Martin, 2019).

2.4 Modo de operación

Los drones de manera general pueden ser operados de diferente manera dependiendo de la actividad en particular a realizar. (Ochoa, 2016) identifica cuatro tipos de modos de operación de los drones. El primero hace referencia al modo manual en el cual el dron es manejado todo el tiempo por radiocontrol. El modo asistido que en esencia es parecido al modo manual, con la diferencia que aquí el autopiloto ejecuta intenciones de vuelo definidas, como el control de la altura y de la posición. En el modo automático existe un plan de vuelo programado previamente en el piloto automático, no obstante el piloto puede retomar el mando de la aeronave en cualquier momento y poner al dron en modo manual o asistido. Por último el modo autónomo que consiste

en programar un plan de vuelo definido, con la diferencia con respecto al automático que una vez que se pone en ejecución el piloto ya no puede retomar el control hasta que el controlador de vuelo termine la misión.

2.5 Aplicación de los drones en la vida civil

Las aplicaciones de los drones se pueden clasificar en diferentes maneras. Pueden basarse en el tipo de misiones: militar o civil, tipo de zonas de vuelo: exteriores o interiores, y tipo de ambientes: bajo el agua, sobre el agua, tierra, aire, espacio (Watts *et al.*, 2012).

2.5.1 Búsqueda y rescate

Una aplicación importante de los drones es su uso en operaciones de búsqueda y misiones de rescate. Estas operaciones necesitan ser muy eficientes debido a que se encuentran vidas en riesgo, para lo cual es necesario tener una visión general inmediata de la situación. Los aviones y helicópteros necesitan tiempo para estar preparados para realizar sus misiones, mientras que los drones pueden activar su misión inmediatamente (Restas, 2015).

2.5.2 Protección del medio ambiente

Los drones se utilizan cada vez más en actividades como la gestión de parques nacionales y tierras agrícolas. Ayudando a rastrear la vida silvestre en diferentes áreas, observar el cambio climático y monitoreo de la biodiversidad en diferentes ecosistemas. Además se pueden utilizar para identificar incendios forestales e investigar desastres naturales (Jim, 2009).

2.5.3 Envío y entrega

Actualmente, los servicios de entrega con drones se han convertido en un tema de interés para varias empresas alrededor del mundo. Por ejemplo, Roger Fingas (2015) menciona que empresas como Amazon, Google y DHL, están utilizando drones para entregar paquetes a sus clientes. Para lograrlo, los drones de reparto están diseñados para despegar y aterrizar verticalmente haciendo una ruta entre la ubicación del paquete y la dirección del cliente (Heutger, 2014).

2.5.4 Exploración del espacio

Los drones se pueden utilizar en una variedad de entornos, incluido el espacio ayudando con la exploración de otros planetas. Debido a sus ventajas sobre otros robots, cada vez es más popular crear y fabricar drones con capacidad de volar y realizar misiones espaciales (Howarth, 2015). La NASA es un buen ejemplo de ello, ya que dedican varias investigaciones enfocadas a la construcción de drones para exploración espacial. El dron Ingenuity de la NASA lleva dos años realizando vuelos en marte, ya son más de cincuenta misiones las que ha completado el pequeño dron tomando imágenes del planeta rojo (Bernat, 2023).

2.5.5 Estudio de ambientes marinos

Los VANT's también pueden volar sobre los ambientes marinos, para estudiar organismos marinos además de poder detectar derrames de petróleo, entre otras más aplicaciones. No obstante, existe un gran reto y limitaciones al utilizar drones en estos entornos, ya que no se cuenta con una pista prolongada de despegue, por lo tanto, todos los despegues y aterrizajes tienen que ser verticales, debido a esto los drones de ala fija no pueden ser utilizados (koh *et al.*, 2012).

2.5.6 Agricultura

Los agricultores buscan constantemente formas más económicas y eficientes para monitorear sus cultivos. Gracias a los sensores con los que se pueden equipar

los drones es posible generar mapas del estado actual del suelo, así como del cultivo, brindando información precisa para poder tomar decisiones en las diferentes etapas del cultivo; desde la planeación y preparación de la tierra hasta la cosecha. Existen drones con capacidad de aplicar por medio de pulverización en tiempo real químicos a los cultivos, también es posible realizar siembras que impliquen distribuir las semillas de forma aleatoria en un área determinada. (Ahirwar *et al.*, 2019).

2.6 Agricultura 4.0

Una de las actividades productivas que más impulsa el desarrollo de la economía de un país es la agricultura. La agricultura de todo el mundo está en busca de la seguridad alimentaria, por ello se están buscando alternativas sostenibles e innovadoras. Actualmente está acuñando un nuevo término llamado agricultura 4.0, el cual hace referencia a un conjunto de tecnologías centradas en la digitalización de los procesos agrícolas. Se basa en el uso de equipos, software y sistemas que pueden mejorar el proceso de producción de principio a fin, reducir el costo de producción y aumentar la sostenibilidad de todo el proceso de producción (BASF, 2022).

Llevar a la práctica la agricultura 4.0 implica una fusión masiva de datos en tiempo real. Los productores pueden utilizar los datos obtenidos de este proceso como guía para tomar decisiones más acertadas para obtener mejor producción. Además, el internet de las cosas (IoT por sus siglas en Inglés) y la inteligencia artificial se están utilizando para automatizar operaciones a gran escala (Asgrow, 2020).

Dentro de las herramientas más destacadas en la agricultura 4.0 se encuentran los drones, una de las innovaciones tecnológicas más famosas de los últimos años. Los cuales son utilizados para visualizar el cultivo de una manera panorámica; la mayoría de los modelos actuales funcionan de manera automática gracias a una configuración preprogramada. Actualmente con la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial, ya tienen la capacidad de identificar ataques de plagas, falta de riego, intentos fallidos de plantación y rastreo de animales (BASF, 2022).

2.7 Mercado de los drones

El tamaño del mercado de los drones se encuentra en constante crecimiento, debido a que se están adoptando en diversas aplicaciones civiles. Se estima que el tamaño del mercado de los drones es de 38.03 mil millones de dólares en 2023, y se prevé que alcance los 62.43 mil millones de dólares para 2028, con una tasa anual de crecimiento de 10.42% en el periodo comprendido entre 2023 y 2028. Además, se espera que los avances tecnológicos, aumenten el rápido crecimiento del mercado (Mondor Intelligence, 2023).

En los últimos seis años, China se ha convertido en el centro mundial de fabricación de drones. Se estima que más del 70% del mercado mundial de drones civiles es fabricado por China. Algunos de los proveedores más destacados en el mercado son Da-Jiang Innovations Science and Technology (DJI), The Boeing Company (Insitu), Terra Dron Corporation, Intel Corporation, BirdsEyeView Aerobotics, Parrot Drones SAS, Yunnec y Delair SAS. Siendo DJI considerada como la empresa líder en fabricación y venta de drones en el mundo (Mondor Intelligence, 2023).

Amazon (2023) menciona que el producto para uso recreativo más vendido en México es el DJI Mini 3 Pro (DJI RC), dentro de sus principales características se encuentran su ligereza y plegabilidad, con capacidad de video 4K a 60 fotogramas por segundo, fotos de 48 MP, 34 minutos de vuelo, y detección de obstáculos tridireccional. El cual es perfecto para fotografías aéreas. Con un precio al mercado de 24,499 pesos mexicanos. Mientras que mercado libre (2023) establece que el dron más vendido en México para uso recreativo es el DJI mini 3 RC fly More. Cuenta con una cámara 4K, una duración de la batería aproximada de 30 min y conexión wifi. El precio al público es de 18, 999 pesos mexicanos.

2.8 Código abierto

El término de código abierto no es nuevo, al principio cuando las computadoras empezaron a utilizarse en las universidades, los códigos de programación realizados

por los universitarios eran herramientas de investigación, el software circulaba libremente; a los programadores se les pagaba por el acto de programar no por los propios programas en particular. No fue sino hasta la integración de las computadoras en el mundo empresarial cuando los programadores comienzan a restringir los derechos de su software y a cobrar tarifas por cada copia (Ebied *et al.*, 2018).

El software libre como una idea política ha sido popularizado por Richard Stallman desde 1984, cuando formó la Free Software Foundation y su proyecto GNU. Debian GNU/Linux es uno de los primeros sistemas Linux y todavía popular en la actualidad, el cual se creó enteramente con software libre. Las directrices de Debian fueron elogiadas en la comunidad de software libre, pues estaban frente a una propia revolución del software libre en ese momento al desarrollar el primer software libre práctico (Ebied *et al.*, 2017).

En los últimos años, varias plataformas (hardware y software) UAV de código abierto han sido desarrolladas por comunidades y proyectos de investigación, para probar e implementar varias aplicaciones de VANT, así como permitir su participación en diferentes aspectos de la vida. Como resultado tenemos plataformas de hardware de arquitectura abierta y software de código abierto cuyos componentes fueron publicados bajo el término de código libre, con la capacidad de controlar de forma autónoma drones multirrotores, aeronaves de ala fija, vehículos terrestres, barcos y submarinos (Ebied *et al.*, 2017). A continuación, se enlistan diferentes ejemplos de plataformas (hardware y software) disponibles para los vehículos no tripulados.

Hardware de arquitectura abierta para vehículos no tripulados:

- Phenix pro
- OcPoc
- PIXHAWK
- PX4
- Paparazzi
- CC3D y Atom
- ArduPilot Mega (APM)

- FlyMaple
- Erle-Brain
- AeroQuad
- Mikrokopter
- MatrixPilot
- BeagleBone (blue, black, mini)

Software de código abierto para vehículos no tripulados:

- ArduPilot
- Multiwii
- AutoQuad
- LibrePilot
- Droncode Community
- Javiator
- OpenPilot

2.9 Estado del arte

Los drones comerciales de marcas como DJI, se venden como elementos cerrados y no admiten modificaciones sin perder la garantía de uso. Además, el costo de adquisición es muy elevado para muchas economías. Por lo tanto, experimentar con ellos resulta inviable debido a la nula accesibilidad a su sistema de programación, aunado al gasto que generaría el dañar el equipo. Para contrarrestar este problema existe una comunidad de Open Source la cual brinda acceso libre a plataformas de software y hardware para construir un dron de cualquier dimensión y funcionalidad. A continuación, se hace una revisión de investigaciones en donde se construyeron drones para cumplir con necesidades específicas, mediante el uso de plataformas de software de código abierto y hardware de arquitectura abierta.

Los drones pueden ser utilizados para atender emergencias humanas y desastres naturales. Ganesano *et al.* (2023) desarrollaron un dron para entrega de productos de atención médica livianos a áreas remotas o de difícil acceso. Su funcionamiento fue basado en el controlador de vuelo APM 2.8 y el piloto automático ArduPilot. Recibe asistencia mediante telemetría para pronósticos en vivo y se posiciona en ruta mediante el uso del sistema de posicionamiento global para entregar los medicamentos en el lugar determinado. Por su parte Jaber *et al.* (2021) trabajaron en el diseño y construcción de un dron para fines de extinción de incendios. Para realizar el control del vuelo se utilizó la placa Pixhawk 2.4 y el piloto automático ArduPilot. Como estación de control en tierra se utilizó el software Mission Planner, en la cual también se programaban las misiones a realizar. Resultando un dron que cumple misiones automáticas para rociar un objetivo con un caudal de 16 litros/minuto.

Se han desarrollado drones que facilitan la realización de algunos trabajos humanos. Uddin *et al.* (2019) construyeron un dron para limpiar ventanas de edificios de gran altura, es controlado remotamente basado en ArduPilot y la controladora de vuelo APM. El control remoto permitió a los trabajadores dar mantenimiento del área circundante, después de rociar agua desde el dron, un cepillo de microfibra limpia las ventanas. Por otra parte, Piriyasupakij *et al.* (2023) realizaron la construcción de un dron hexagonal autónomo para detectar intrusos en zonas de vigilancia. La unidad de control se divide en controlador de vuelo y unidad de control de cámara de detección de intrusos. Como control de vuelo se utilizó la placa Pixhawk y el piloto automático ArduPilot. La cámara de detección de intrusos utiliza la plataforma Roboflow para detectar personas. La planificación de las misiones se realiza a través del programa de control en tierra Mission Planner. Se encontró una efectividad del 97% para la detección de humanos a una altura de tres metros.

En el ámbito educativo varios autores describen la realización de trabajos con drones. Barrera (2018) desarrollo un proyecto de fin de grado en el cual construyó un dron utilizando la tarjeta Raspberry Pi-3, pero al no tener una unidad de medición inercial (IMU) integrada la complemento con el autopiloto NAVIO2, el cual cuenta con la capacidad de hacer uso del piloto automático ArduPilot. El objetivo principal fue tener

una aeronave para la obtención de fotos y video, motivo por el cual incorporó el módulo de cámara propio de Raspberry Pi. Las imágenes se obtienen en la estación terrestre por medio de MAVLink y QGroundControl. El control de la aeronave se realiza de manera asistida, mediante el radiocontrol Taranis X9D plus. Por su parte Yilun *et al.* (2019) desarrollaron el dron Phoenix basando su control en el piloto automático Ardupilot y la controladora de vuelo PX4. Como resultados obtuvieron un dron con vuelo automático estable en interiores y exteriores, diseñado para investigación y educación.

El internet de las cosas ha sido incluido en los drones. Ting *et al.* (2023) realizaron la construcción de un dron integrando ArduPilot con la plataforma móvil Android, permitiendo que el dron contara con potencia informática a través de conectividad 4G/5G. Utilizando la plataforma AI Wings, la cual proporciona un servidor en la nube para comandar drones de forma segura por medio del internet de las cosas. Mientras que Vidal *et al.* (2017) trabajaron en el desarrollo de un dron posicionado por técnicas de visión por computadora. Utilizando la controladora de vuelo Pixhawk y el piloto automático ArduPilot, así como una cámara GoPro y dispositivos de comunicación con la estación terrestre y el transmisor de video. Obteniendo un dron con posicionamiento a partir de visión por computadora, añadiendo seguridad y precisión, superando errores intrínsecos de otros sensores de posicionamiento.

En el ámbito de la agricultura Jabair *et al.* (2018) desarrollaron un dron agrícola autónomo para siembra de pequeñas semillas. Como piloto automático utilizan ArduPilot en la controladora de vuelo APM 2.8 y Mission Planner como estación de control en tierra. El sistema de siembra fue diseñado e impreso en plástico, funciona mediante un servomotor y un motor de paso. Con una tasa máxima de siembra de semillas de $498 \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$. Por su parte Mahmud *et al.* (2020) realizaron un trabajo de diseño y desarrollo de un dron agrícola autónomo para fumigación de pesticidas. Utilizaron como controladora de vuelo la placa APM 2.8 con el piloto automático ArduPilot en su versión 3.7.1 y como estación de control en tierra el software Mission Planner 1.3.45. El dispositivo de pulverización puede liberar pesticidas a una velocidad

de 0.3 litros por segundo. Mientras que Ramírez *et al.* (2023) desarrollaron un dron para generar mapas 3D de índices de vegetación a bordo de la aeronave. Este trabajo propone un sistema aéreo no tripulado que pueda proporcionar índices de vegetación a baja altura. El sistema propuesto cuenta con un módulo NVIDIA Jetson AGX Xavier como computadora. Se pueden realizar cálculos de dos índices de vegetación basados en el espectro visible: el índice de vegetación de diferencia normalizada verde y el índice de vegetación de diferencia de banda visible.

En el interés de que un dron pueda recolectar datos directamente del suelo Martínez *et al.* (2022) presentan como propuesta un sistema de recolección de muestras de suelo con un dron, compuesto por un una broca y actuadores capaz de penetrar 20 cm, sin embargo, no presentan resultados de la recolección de las muestras de suelo ni de su análisis. Mientras que Smith *et al.* (2022) desarrollaron un prototipo de un dron con el cual se pueden recolectar muestras de 8 gr del suelo. Para lograrlo se realiza la activación de un actuador neumático el cual lanza un pequeño tubo contra el suelo. Sin embargo, no presentan análisis de datos de alguna muestra de suelo recolectada.

Para realizar aterrizajes con precisión Tanaka y Matsumoto (2019), presentan un sistema autónomo de guiado y control de aterrizaje para drones en ambiente interior, mediante una cámara y marcadores visuales. Por su parte Springer y Kyas (2022), proponen un método de aterrizaje autónomo que utiliza una cámara montada en un cardan para buscar la plataforma de aterrizaje marcada previamente con marcadores fiduciales. Mientras que Marcon *et al.* (2018) utilizaron un sistema RTK para tener un aterrizaje más preciso en un vehículo aéreo no tripulado.

Es posible que un dron continúe con una misión automática después de aterrizar. Teran (2023) menciona que el programa Amazon Prime Air, desarrolló un dron hexagonal llamado MK27-2, el cual realiza entrega de paquetes aterrizando en una marca visual colocada en los patios de los clientes, para dejar ahí el paquete y continuar con la ruta. Al ser una compañía privada no hay documentación al respecto, sin embargo, ArduPilot Dev Team (2023) describe un ejemplo simulado en el software

Mission Planner, en donde es posible hacer que la aeronave pueda continuar con la misión después de aterrizar.

Después de hacer una revisión sobre el tema de interés para esta investigación, es posible concluir que existe muchos drones construidos con plataformas de software de código abierto y hardware de arquitectura abierta, los cuales cubren diferentes necesidades de la vida cotidiana. También es posible señalar que en el ámbito de la agricultura la mayoría de los drones adquieren información del suelo mientras realizan su vuelo, existe poca información sobre drones que tomen datos directamente del suelo. Adicionalmente es posible señalar que las placas APM y Pixhawk son las más utilizadas como controlador de vuelo para estos proyectos, debido a la existencia de bastante documentación y por tener integrado el piloto automático ArduPilot. No obstante, existen placas con mayor capacidad de procesamiento como la placa BeagleBone Blue, a las cuales también se les puede integrar ArduPilot, sin embargo, existe muy poca información respecto a ella.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de la investigación

La presente investigación se realizó en el departamento de maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en calzada Antonio Narro #1923, Buenavista, 25315 Saltillo, Coahuila, localizada al sureste de la ciudad, a una altura de 1780 metros sobre el nivel del mar. Las pruebas de vuelo se realizaron dentro de la Universidad, en el campo número dos de futbol soccer el cual se ubica en las coordenadas 25.35032 Lat. Norte y -101.03125 Long. Oeste.

3.2 Materiales

3.2.1 BeagleBone Blue

La BeagleBone Blue (BBBlue) es una placa de desarrollo basada en Linux, diseñada especialmente para aplicaciones de robótica y de control. Con un tamaño de 3.5" x 2.15" integra el microprocesador Octavo OSD3358 junto con conectividad WiFi y Bluetooth, una IMU de nueve ejes, barómetro, regulación de potencia e indicación de estado de carga para LiPo de 2 celdas, controladores para 4 motores de corriente continua y 8 servomotores, además de todos los buses comúnmente necesarios para periféricos adicionales en aplicaciones integradas (Beagleboard.org, 2023). Dentro de las características decisivas para el uso de esta placa en el proyecto se encuentran su interfaz de potencia flexible y puertos de expansión que permiten la conexión de

diversos dispositivos y sensores. La Figura 3.1 muestra el diagrama pinout de la placa BeagleBone Blue.

Especificaciones:

- Procesador
 - ARM Cortex-A8 de 1GHz
 - 2 unidades programables en tiempo real (PRU) de 200 MHz y 32-bits
 - 512 MB de RAM DDR3 integrada
 - Memoria flash eMMC de 4GB y 8 bits

- Sensores:
 - MPU9250 para acelerómetro, giroscopio y brújula interna (I2C)
 - Barómetro BMP280

- Interfaces:
 - Wifi (802.11bgn)
 - Bluetooth 4.1 y BLE
 - 8 salidas ESC/Servo de (6v), 4 salidas de motor DC
 - Cliente y host USB 2.0
 - 11 LEDs programables
 - 2 botones
 - Analógico de 1.8 V
 - SPI, I2C, UART
 - Soporte LiPo de 2 celdas con equilibrio, entrada de cargador de 9-18 V

- Sistema Operativo:
 - Linux (Debian)

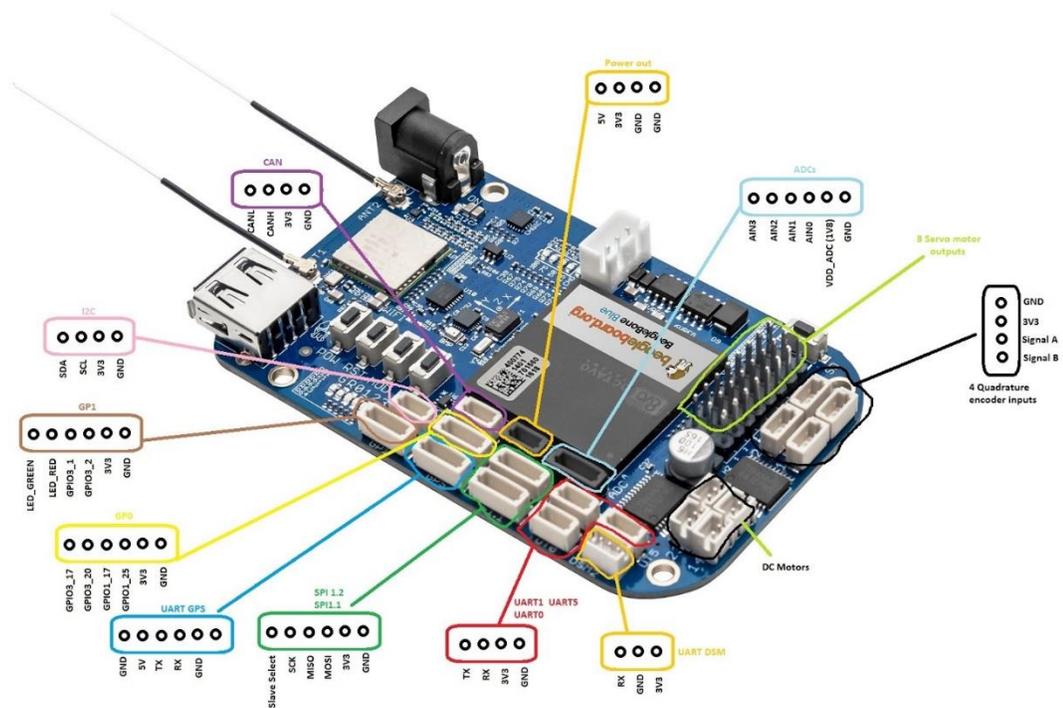


Figura 3.1 Diagrama pinout de la placa BeagleBone Blue. (ArduPilot Dev Team, 2023).

3.2.2 Chasis S500

El chasis S500 es una estructura de cuadricóptero diseñada para la construcción de drones de tamaño mediano, la ilustración del chasis se puede ver en la Figura 3.2. Fabricado típicamente con materiales ligeros pero robustos, como fibra de vidrio y nailon de poliamida, tiene puntos de montaje específicos para los motores y espacio dedicado para la instalación de la electrónica (Mercado Libre, 2023). Una característica decisiva para la elección del chasis S500 en este proyecto es su diseño en X, que contribuye a una distribución equitativa del peso y a una mayor estabilidad durante el vuelo.



Figura 3.2 Chasis Dron S500. (Mercado Libre, 2023).

3.2.3 Motores MultiStar 2212 de 920 KV

Los motores MultiStar 2212 de 920 KV son motores sin escobillas de corriente continua diseñados para aplicaciones de aeromodelismo y drones. Tienen un diámetro de 22 mm, una altura de 12 mm y un peso típico de 50 gramos. El valor KV de 920 indica que estos motores ofrecen una velocidad de 920 revoluciones por voltio de alimentación. Tienen una corriente máxima continua de 20 amperios y son compatibles con baterías Lipo de 2 a 3 celdas (RC Groups, 2023). Estos motores generalmente se utilizan con hélices de 8 a 10 pulgadas y pueden proporcionar un empuje adecuado para drones de tamaño medio, lo que favorece su uso en este proyecto. La Figura 3.3 muestra la imagen de un motor MultiStar 2212.



Figura 3.3 Motor MultiStar 2212 de 920 Kv. (RC Groups, 2023).

3.2.4 Hélices 9450

Las hélices 9450 tienen una longitud de 9.4 pulgadas y un paso de 5 pulgadas, la Figura 3.4 muestra la ilustración de estas hélices. Se decidió utilizar estas hélices porque dentro de sus características destacan el proporcionar un equilibrio entre empuje, eficiencia y estabilidad en vuelo, además son compatibles con una amplia gama de drones, y se utilizan comúnmente en combinación con motores de tamaño medio, como los motores MultiStar 2212 mencionados anteriormente.



Figura 3.4 Hélices 9450 bipalas auto bloqueables. (Drone Doctors, 2023).

3.2.5 Controladores eléctricos de velocidad (ESCs) MultiStar 32Bit 30A

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, los motores brushless requieren de un circuito electrónico para que giren de manera efectiva y a la velocidad especificada. Para este proyecto se decidió utilizar los controladores eléctricos de velocidad MultiStar 32Bit 30A (Figura 3.5), debido a que estos ESC utilizan tecnología de procesador de 32 bits para ofrecer una respuesta rápida y suave a las entradas de control, lo que resulta en un rendimiento de vuelo más estable y preciso. Además, tienen una capacidad de corriente continua de hasta 30 amperios, lo que los hace adecuados para los motores MultiStar 2212. Adicionalmente, están equipados con una variedad de características de protección, como protección contra sobre-corriente, sobre-voltaje y sobre-temperatura, para garantizar la seguridad y la durabilidad durante el vuelo.



Figura 3.5 Controladores eléctricos de velocidad MultiStar 32Bit 30A. (HobbyKing, 2023).

3.2.6 Batería Li-Po Turnigy 5000 mAh 3s

Para proyectos de vehículos con alto rendimiento comúnmente se utilizan las baterías Li-Po, sin embargo, existe una gran variedad de modelos, por lo cual sus características vienen especificadas en la etiqueta del fabricante. En particular, para este proyecto se eligió la batería Lipo Turnigy con una capacidad de carga de 5000 mAh y 3 celdas (Figura 3.6), lo que le permite almacenar una cantidad considerable de energía, proporcionando una larga duración de funcionamiento. Cuenta con un voltaje nominal de alrededor de 3.7 voltios por celda, generando un voltaje total de aproximadamente 11.1 voltios. Viene equipada con un conector balanceador (JST-XH) y un conector principal (TX-60), simplificando su uso en el dron al poder conectarla fácilmente, tanto para carga como para descarga. Además, su variedad de tasas de descarga la hace adecuada para ser utilizada junto con los motores MultiStar 2212.



Figura 3.6 Batería LiPo Turnigy 5000mAh 3S 11.1V. (techmake, 2023).

3.2.7 Cargador de equilibrio de batería AC/DC con fuente de alimentación, Hobbyking ECO SIX 80W 6A 2~6S

La batería Li-Po Turnigy seleccionada necesita ser recargada cada vez que se requiera, para lo cual es necesario contar con un cargador de baterías. En este caso, se contaba en el lugar de la investigación con el cargador Hobbyking ECO SIX (Figura 3.7), el cual cuenta con una potencia máxima de salida de 80 vatios y una corriente máxima de carga de 6 amperios. Además, ofrece capacidades robustas para cargar baterías polímero de litio (LiPo), níquel-metal hidruro (NiMH) y níquel-cadmio (NiCd) de hasta 6 celdas. También, cuenta con una pantalla LCD que proporciona una visualización clara de la información clave durante el proceso de carga, como el voltaje de la batería y la corriente de carga.



Figura 3.7 Hobbyking ECO SIX 80W 6A 2-6S Cargador de equilibrio de batería. (RCModelScout, 2023).

3.2.8 Sensor LIDAR TFmini-S

Uno de los objetivos de este proyecto consiste en poder realizar aterrizajes con el mayor control posible, para lo cual se requiere tener el valor de la altura lo más exacto y preciso posible. Como principal fuente del dato de la altura se decidió utilizar el sensor LIDAR Tfmini-S (Figura 3.8), el cual utiliza tecnología de detección de luz láser para medir distancias, con un rango de detección desde 10 cm hasta 12 m con una resolución de 1 cm y una frecuencia de muestreo de hasta 1000 Hz. Su diseño resistente al agua y al polvo lo hace adecuado para ser utilizado en el dron. Además, su interfaz serial UART estándar facilita su integración con la placa BBBlue. (SparkFun Electronics, 2023).



Figura 3.8 Sensor LIDAR TFmini-S. (SparkFun Electronics, 2023).

3.2.9 JST SH Jumper

La placa BBBlue cuenta con interfaces JST-SH para agregar periféricos adicionales, por lo cual es necesario utilizar los conectores JST-SH (Figura 3.9). Estos conectores son un tipo de conectores electrónicos compactos, están diseñados para ser de bajo perfil y ocupar poco espacio, lo que los hace ideales para este proyecto. Además, ofrecen una conexión segura y confiable, debido al diseño de sus contactos en forma de clavijas macho y hembras.

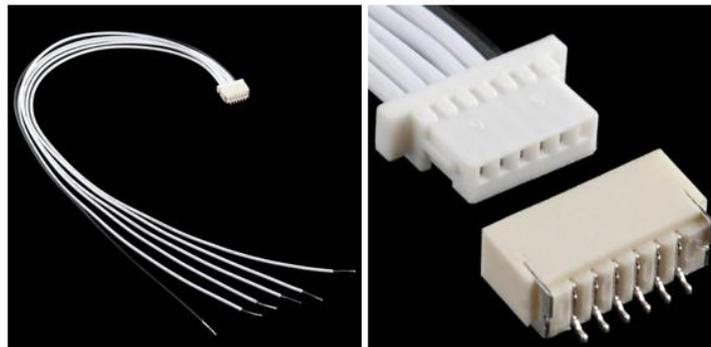


Figura 3.9 JST SH Jumper 6 pines. (Robot Gear, 2019).

3.2.10 GPS-RTK2 con el módulo ZED-F9P-02B-00

Uno de los objetivos específicos de este proyecto consiste en tener un sistema de corrección RTK, para lograr esto, se requiere tener módulos GNSS con tecnología para ofrecer correcciones de posicionamiento en tiempo real. En este caso se eligió el GPS-RTK2 (Figura 3.10), el cual incorpora el chip receptor GNSS u-blox ZED-F9P-02B-00, conocido por su capacidad de proporcionar una recepción excepcional y soporte para múltiples constelaciones de satélites, incluyendo GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou. Además, cuenta con una alta tasa de actualización de datos y capacidad para proporcionar correcciones de posicionamiento RTK en tiempo real a una velocidad de hasta 20 Hz. (SparkFun Electronics, 2023).



Figura 3.10 GPS-RTK2 con el módulo ZED-F9P-02B-00. (SparkFun Electronics, 2023).

3.2.11 Digi XBee SX 868

Como ya se explicó en el capítulo anterior, el funcionamiento del sistema de corrección RTK radica en el empleo de dos receptores, uno usado como referencia fija y otro móvil. La estación base requiere estar enviando información a la estación móvil, la cual es utilizada para calcular el error. Para poder enviar los mensajes de corrección

es necesario tener una comunicación inalámbrica entre la base y el rover, para lo cual se eligió el módulo Digi XBee SX 868 (Figura 3.11). Dentro de sus características destacan su capacidad de proporcionar comunicación inalámbrica de largo alcance y baja potencia, pues fue diseñado para aplicaciones industriales y el internet de las cosas, operando en la banda de frecuencia de 868 MHz. Además, puede configurarse para operar en diferentes modos, como punto a punto, punto a multipunto o malla. (Matlog, 2023).



Figura 3.11 Kit Digi XBee SX 868. (Matlog, 2023).

3.2.12 Módulo GPS UBX M10050

En las primeras pruebas de vuelo, al no tener totalmente calibradas todas las ganancias, el dron podría sufrir algunas caídas. Para evitar dañar el módulo GPS-RTK2, se incorporó un módulo más económico y pequeño, que si sufría daños no significaría gran pérdida económica para el proyecto. Se eligió el módulo GPS UBX M10050 el cual es un módulo de la serie M10 de u-blox. El cual es un receptor GNSS que pueden recibir señales de múltiples constelaciones de satélites, lo que aumenta la precisión y la disponibilidad de la señal en diferentes ubicaciones geográficas. Además, tiene una antena integrada, lo que favorece su utilización en las primeras pruebas al prescindir del espacio de la antena.

3.2.13 Antena Taoglas Magma AA.171 y antena multibanda AS-ANT2B-SUR-L1L2-25SMA-00

El módulo GPS-RTK2 necesita de una antena multibanda para tener recepción de señales GNSS. En este caso se eligió la antena Taoglas Magma AA.171 (Figura 3.12) para el rover y la antena multibanda AS-ANT2B-SUR-L1L2-25SMA-00 para la base, ambas antenas ofrecen un alto rendimiento en la recepción de señales GNSS, incluyendo GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou. Con la diferencia, que la antena AS-ANT2B-SUR-L1L2-25SMA-00 tiene mayor ganancia, por eso fue elegida para la base considerando también que está muy pesada para el dron y ocupa mucho espacio. Además, la antena Magma AA.171 cuenta con fijación magnética facilitando su colocación en el dron.



Figura 3.12 Antena Taoglas Magma AA.171.
(Taoglas, 2023).

3.2.14 Protecciones de las hélices

Para prevenir durante el vuelo posibles colisiones y daños, tanto a las hélices como a objetos circundantes, se decidió incorporar protectores de hélices. Particularmente, se eligieron los protectores de Hélices Dji Phantom 3 (Figura 3.13), cuyas medidas coinciden con las del chasis S500 y las hélices 9450. Además, están fabricados en plástico resistente pero ligero, lo cual proporciona protección al dron sin añadir mucho peso.



Figura 3.13 Protectores de Helices Dji Phantom 3. (Mercado libre, 2023).

3.2.15 Magnetómetro HMC5883L

EL módulo HMC5883L (Figura 3.14) es un sensor de campo magnético de tres ejes, por lo que permite medir el campo magnético en las direcciones X, Y y Z, proporcionando información de la orientación y el rumbo del dron. Dentro de sus características destacan, su capacidad para comunicarse con microcontroladores a través de interfaces estándar como I2C o SPI, facilitando su integración en la placa BBBlue, además de ofrecer alta precisión en un pequeño formato, lo que la hace ideal para su incorporación en el dron.

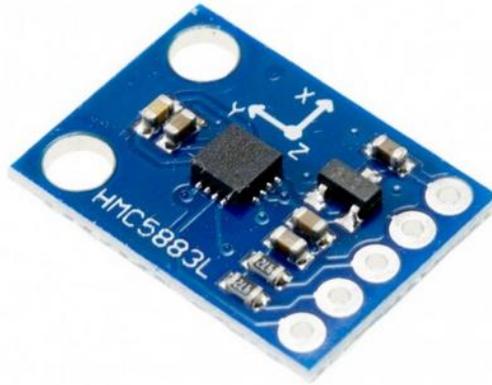


Figura 3.14 Módulo magnetómetro 3-ejes HMC5883L. (Naylamp Mechatronics, 2023).

3.2.16 Radiocontrol Turnigy 2.4G de 9 canales

El proyecto necesita de un radiocontrol para poder controlar los movimientos deseados del dron en la fase de pruebas y sintonización de las ganancias de control, además para poder retomar el control manual de la aeronave en caso de una falla durante un vuelo automático. Se decidió utilizar un radio control Turnigy 2.4G (Figura 3.15) de nueve canales con el cual se contaba en el lugar de la investigación. Este radiocontrol utiliza la tecnología de radiofrecuencia de 2.4 GHz para proporcionar una comunicación inalámbrica confiable entre el transmisor y el receptor del vehículo, lo que garantiza un control preciso y receptivo. Además, dispone de nueve canales, lo que ofrece una amplia capacidad de control para diversas funciones y características en el dron, lo que permite ajustar y personalizar la experiencia de control de acuerdo con las necesidades específicas del proyecto.



Figura 3.15 Radio Control Remoto 2.4ghz Turnigy 9x. (Mercado Libre, 2023).

3.2.17 Receptor Turnigy modificado para comunicación mediante señal PPM con la placa BBBlue

El receptor Turnigy decodifica la señal PWM recibida por parte del radiocontrol y produce una salida correspondiente a cada canal de control, sin embargo, el receptor tiene una salida PWM para cada canal. No obstante, la placa BBBlue no cuenta con las conexiones de entrada dedicadas a la comunicación PWM para radiocontrol, solo cuenta con una conexión de entrada para comunicación por señal PPM (*Pulse Position Modulation*). La comunicación por señal PPM es un método utilizado en el control de modelos de radiocontrol, como aviones y drones. En este sistema, múltiples señales de control, como el roll, pitch, yaw y el acelerador, se combinan en un solo tren de pulsos, donde la duración de cada pulso codifica la posición del control correspondiente. Esto permite la transmisión eficiente de múltiples canales de control a través de un único cable o canal de comunicación (H. Hamil et al., 2019). Dado lo anterior, se modificó el receptor Turnigy con el cual se contaba en el lugar de la investigación, para que funcionara mediante este método, la Figura 3.16 muestra una ilustración de la modificación.

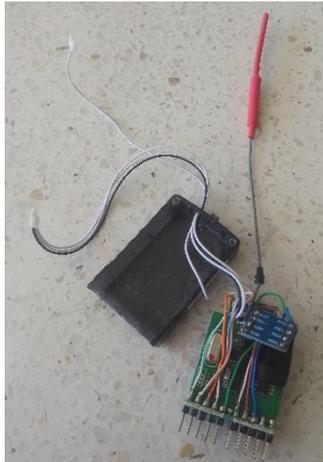


Figura 3.16 Receptor Turnigy modificado para comunicación mediante señal PPM.

3.2.17.1 Arduino Mini Pro

Para poder generar la señal PPM a partir de las señales PWM de cada canal individual, es necesario contar con un microcontrolador adicional, para lo cual se eligió la placa de desarrollo Arduino Mini Pro (Figura 3.17). Principalmente su elección radica en que es una versión compacta y económica de la placa de desarrollo Arduino, diseñada para proyectos donde el espacio y el costo son críticos. Además, conserva muchas de las mismas características y funcionalidades que las placas de desarrollo Arduino estándar, como el microcontrolador ATmega328P, puertos de entrada/salida digital y analógica, capacidad de programación mediante el entorno de desarrollo Arduino IDE, y compatibilidad con una amplia variedad de componentes electrónicos. (THIDO electrónica, 2021).

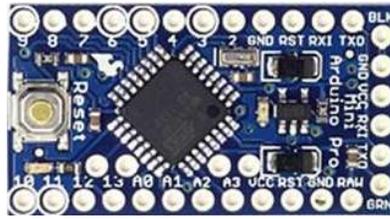


Figura 3.17 Arduino Mini Pro (THIDO electrónica, 2021).

3.2.18 Módulo de desarrollo TTGO con ESP32 y display

La estación base del sistema RTK necesita de un microcontrolador para configurar e inicializar el módulo GPS-RTK2. Además de gestionar el envío de la señal a través del módulo de radio. También se encarga del despliegue de la información en la pantalla. Para lo cual se eligió el módulo de desarrollo TTGO (Figura 3.18) con ESP32 y display. Una de las características decisivas para su elección es que combina el potente microcontrolador ESP32, el cual utiliza un procesador de doble núcleo Tensilica Xtensa LX6, que puede funcionar a una velocidad de hasta 240 MHz, una RAM de 520 KB y ROM de 448 KB. Además, el módulo TTGO cuenta con un display integrado, lo que permite la visualización de datos que resultan de interés en la estación base.



Figura 3.18 módulo de desarrollo TTGO ESP32 con display 1.14P, USB TIPO C, WIFI 4MB. (Starware, 2023).

3.2.19 LEDs

Para monitorear el correcto funcionamiento de la estación base del sistema RTK, se colocaron varios LED. Los cuales indican diferentes acciones de los módulos, como por ejemplo la potencia de la señal del módulo de radio, el estado activo de la corrección RTK, frecuencia del envío de datos, entre otros. Los LED (Figura 3.19), o diodos emisores de luz, son dispositivos semiconductores que convierten la corriente eléctrica en luz visible de manera eficiente. Su funcionamiento se basa en la emisión de fotones cuando los electrones se recombinan en la unión de material semiconductor. Estos dispositivos ofrecen numerosas ventajas sobre las fuentes de luz convencionales, como una mayor eficiencia energética, una vida útil más larga y una mayor durabilidad. (Unicrom, 2023).



Figura 3.19 LED Diodo emisor de luz. (Unicrom, 2023).

3.2.20 Imagen Debían habilitada para BeagleBone Blue

Una imagen es un tipo de archivo donde se almacena una copia idéntica de otro o de un sistema de archivos. De esta manera, en un archivo puede haber dentro muchos otros archivos, pertenecientes a un programa completo o bien archivos sueltos, aunque se suele hablar de imagen cuando se refiere al programa completo reducidos a un único archivo. Este tipo de ficheros es utilizado a la hora de instalar programas, con el fin de proporcionar una copia exacta de todo el sistema de archivos al completo (López, 2023).

Debian es un sistema operativo basado en GNU/Linux de código abierto, totalmente gratuito para cualquier uso. Es una de las distribuciones más importantes, con una trayectoria que comenzó en 1993, impulsado por Ian Murdock. De hecho, se trata de uno de los sistemas operativos basados en el kernel de Linux más antiguos. Dentro de sus características destacan que solamente incluye software gratuito, además de mantener una alta estabilidad del sistema. Entre sus principales distribuciones derivadas se encuentran: Ubuntu, Linux Mint, Raspbian, Lubuntu, Deepin, MX Linux, PureOS, Kali Linux, SteamOS y muchas otras que están también basadas en Debian (García, 2022). Sin embargo, no se utilizó ninguna de estas distribuciones porque no está comprobada su estabilidad en la placa BBBlue, además [ArduPilot Wiki 57](#) el cual fue utilizado para la instalación del firmware de ArduPilot en la placa de control BBBlue, no contiene ninguna de estas distribuciones.

3.2.21 ArduPilot

ArduPilot es un firmware de código abierto que se ejecuta en una amplia gama de hardware. Aunque ArduPilot no fabrica ningún hardware, el firmware de ArduPilot funciona en una amplia variedad de hardware diferente para controlar vehículos no tripulados de todo tipo. Junto con el software de control terrestre, los vehículos no tripulados que ejecutan ArduPilot pueden tener funciones avanzadas que incluyen comunicación en tiempo real con los operadores. Se eligió este software porque proporciona un conjunto completo de herramientas adecuadas para casi cualquier vehículo y aplicación, además de ser de código abierto. (ArduPilot Dev Team, 2023).

3.2.21.1 Modos de vuelo

ArduPilot ofrece una variedad de modos de vuelo que permiten a los usuarios controlar sus vehículos aéreos de diferentes maneras según sus necesidades y preferencias. Algunos de los modos de vuelo más comunes en ArduPilot son:

- **Manual o Acrobático:** En este modo, el piloto tiene control total sobre el vehículo y debe controlar manualmente la velocidad angular en cada eje.

- Estabilizado: Este modo ayuda a estabilizar el vehículo automáticamente, manteniéndolo nivelado en el aire, lo que facilita el vuelo o la conducción para pilotos menos experimentados.
- Mantener altura: En este modo, el vehículo mantiene automáticamente una altitud constante, permitiendo al piloto centrarse en otros aspectos de la navegación.
- Mantener posición: En este modo, el vehículo intenta mantener la ubicación, el rumbo y la altitud actuales. Lo que permite al piloto detener el vehículo en un lugar específico sin tener que controlar activamente los controles.
- Auto: En este modo, el vehículo sigue un plan de vuelo predefinido, siguiendo una serie de waypoints o puntos de control de manera automática.
- RTL (Return to Launch): Cuando se activa este modo, el vehículo regresa automáticamente al punto de lanzamiento y aterriza de manera segura.
- Guiado: Permite al piloto enviar comandos de navegación directamente al vehículo, por ejemplo, para moverlo a una ubicación específica en el mapa.

Estos son algunos de los modos de vuelo más comunes en Ardupilot. Dependiendo de la configuración específica del vehículo y las necesidades del usuario, pueden existir otros modos o variaciones de estos modos básicos. (ArduPilot Dev Team, 2023).

3.2.22 Mission Planner

Mission Planner es una aplicación de software de código abierto diseñado para la planificación y el control de vehículos aéreos y terrestres no tripulados que utilizan el firmware de ArduPilot. Con una interfaz gráfica intuitiva, esta herramienta permite planificar y ejecutar misiones de vuelo de manera eficiente, configurar y calibrar los vehículos, y realizar un seguimiento en tiempo real de los datos de telemetría. (ArduPilot Dev Team, 2023).

3.2.22.1 Misión

En Mission Planner, una misión se refiere a un conjunto de instrucciones predefinidas que se cargan en un vehículo no tripulado controlado por ArduPilot, para permitirle realizar una serie de acciones de forma autónoma. Estas acciones pueden incluir la navegación hacia puntos específicos en un mapa, denominados como puntos de control (waypoints), la realización de tareas específicas en esos puntos (como cambiar de altitud, tomar fotografías o realizar mediciones), y el retorno seguro al punto de origen. Una vez creada y cargada la misión en el vehículo, este puede ejecutar las acciones planificadas sin necesidad de intervención directa del operador, lo que permite la automatización de tareas y la realización eficiente de diversas actividades con vehículos no tripulados. (ArduPilot Dev Team, 2023).

3.2.23 Balena Etcher

Balena Etcher, comúnmente conocido como Etcher, es una aplicación de software de código abierto utilizada para grabar imágenes de sistemas operativos y otros archivos binarios en tarjetas de memoria y unidades USB. Etcher tiene una interfaz de usuario simple y fácil de usar, permitiendo crear medios de arranque para sistemas operativos como Linux, Windows y macOS, así como para dispositivos de desarrollo como Raspberry Pi y otras placas de circuito (balenaEtcher.online, 2023). En este proyecto se utilizó para grabar la imagen del sistema operativo Debian en la memoria microSD.

3.2.24 Tarjeta microSD de 16 GB

La tarjeta de microSD es un dispositivo de almacenamiento de datos compacto y versátil el cual se utiliza comúnmente en una variedad de dispositivos electrónicos, como teléfonos inteligentes, cámaras digitales y consolas de juegos. En este proyecto se utilizó para cargar la imagen Debian en la placa BBBlue, por lo que, se eligió con una capacidad de almacenamiento de 16 Gigabytes, espacio suficiente para almacenar una cantidad considerable de archivos digitales. (Kentfaith, 2023).

3.2.25 Computadora portátil HP Pavilion

La computadora portátil HP Pavilion tiene una pantalla de 13 pulgadas, un procesador Intel Core i3 inside con 8 GB de Memoria RAM y un disco duro de 500 GB y cuenta con el sistema operativo Windows 10. Pero se realizó una modificación instalándole dualmente el sistema operativo Linux en su distribución de Ubuntu, pues será necesario para poder interactuar inicialmente con la placa BBBlue.

3.2.26 MATLAB

MATLAB es un lenguaje de programación que opera dentro de un entorno de desarrollo integrado, diseñado para el cálculo numérico, análisis y visualización de datos. Cuenta con una amplia gama de funciones incorporadas y herramientas para resolver problemas complejos mediante operaciones matemáticas y manipulación de matrices (MathWorks, 2023). Se eligió para el proyecto, por su capacidad para generar gráficos de alta calidad, además de ser una herramienta poderosa para el análisis de datos y la creación de modelos numéricos. Facilitando el análisis y la presentación grafica de los datos de vuelos generados en cada prueba del proyecto.

3.3 Métodos

La metodología que se siguió para la realización del presente trabajo se divide en tres partes: primeramente, la instalación del software necesario tanto en la placa BBBlue como en la computadora portátil. Para después continuar con la construcción de todos los sistemas que formarán parte del dron, haciendo todas las conexiones necesarias para el funcionamiento de cada componente que integrarán los sistemas. Finalmente, se concluye con la calibración de ganancias y pruebas de vuelo con misiones automáticas y eventos específicos.

3.3.1 Instalación del software

Como ya se mencionó, la BBBlue es una placa de desarrollo habilitada para Linux, por lo que necesita una imagen del sistema operativo Debian. Por lo cual primero se procedió a la instalación de la imagen bone-debian-9.12-console-armhf-2020-06-01-1gb.img a través de una tarjeta micro SD de 16 GB y el programa balenaEtcher. Se probaron 7 versiones más actuales, pero se tenían problemas de compatibilidad con el firmware de ArduPilot, siendo la versión 9.12 de junio de 2020 con la que se obtuvieron los resultados deseados.

Para la instalación del firmware de ArduPilot en la BBBlue se siguieron las indicaciones marcadas en [ArduPilot Wiki 57](#) (ArduPilot Dev Team, 2023), para lo cual fue necesario contar con una computadora con sistema operativo Linux, pues al tener una imagen Debian en la placa BBBlue, fue más fácil la comunicación ssh (Secure Shell), la cual es un protocolo de red que permite a los usuarios acceder y administrar de forma segura dispositivos remotos. Esta comunicación es requerida para la configuración de la BBBlue en la instalación de ArduPilot. La versión instalada de ArduPilot fue la 4.2.3. También se instaló la última versión disponible de Mission Planner en la computadora portátil, obtenida del wiki de ArduPilot disponible en <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-installation.html> , al momento de la instalación la versión disponible fue 1.3.77.

3.3.2 Construcción de todos los sistemas

Antes de empezar a realizar cualquier instalación de los componentes electrónicos y mecánicos, se procedió a armar primero el chasis del dron utilizando las piezas del modelo S500. Una vez armado, el chasis se convierte en la plataforma sobre la cual se organizarán y fijarán los componentes, asegurando que el dron tenga una base sólida y equilibrada para su funcionamiento y vuelo adecuado.

3.3.2.1 Sistema de alimentación eléctrica

La batería Lipo Turnigy de 5000 mAh es el elemento más pesado que debe cargar el dron. Por lo tanto, su colocación en la estructura tiene que ser estratégica para tener una distribución de peso uniforme, por lo que se eligió el centro del chasis designando a ese punto como el centro de masa de la batería. Para la colocación de la batería, en primera instancia se fijó directamente al chasis, mediante bridas de plástico. Sin embargo, en los primeros vuelos de calibración debido a la posición en la que se encontraba, resultó golpeada al tener una caída. También, al estar sujeta al dron resultaba más difícil el poder recargarla. Por lo que se decidió construir un compartimento resistente donde cupiera y pudiera retirarse con facilidad, para poder recargarla más fácil cuando se requiriera. La manera en la cual quedó constituido el compartimento se muestra en la Figura 3.20.

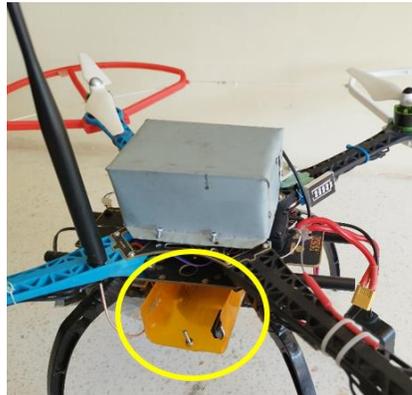


Figura 3.20 Compartimento en el dron para la batería Lipo.

Para tener alimentación en la placa de distribución incorporada en el chasis S500, se fabricó una conexión utilizando un conector macho TX-60 (Figura 3.21). Soldando este mismo a los polos correspondientes de la placa de distribución y así tener el voltaje de 11.1 V de la batería en la placa, con el cual funcionan los motores. De la misma manera para poder tener alimentación en la placa BBBlue se fabricó una conexión utilizando un conector JST-XH (Figura 3.21). Para tomar alimentación de dos

celdas de la batería, obteniendo un voltaje de 7.4 V, con el cual se alimenta la tarjeta BBBlue.

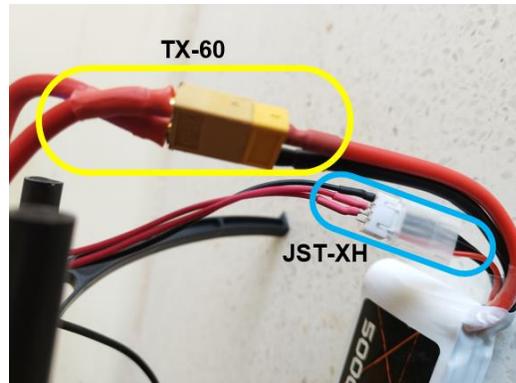


Figura 3.21 Conexiones TX-60 y JST-XH para la alimentación del drone.

3.3.2.2 Sistemas de propulsión

Se colocaron los cuatro motores en los puntos de montaje específicos de los brazos del chasis S500, fijándolos a la estructura mediante tornillos. Después se conectaron los motores a través de conectores tipo bala a los ESC's. Posteriormente se conectaron cada uno de los ESC's a la placa de distribución de energía, soldándolos con ayuda de estaño y cautín. De igual manera se realizaron las conexiones de los ESC's a las salidas PWM de la BBBlue; la descripción se muestra en la Figura 3.22.



Figura 3.22 Descripción de las conexiones en los ESC's.

Teniendo todas las conexiones necesarias para que los motores funcionaran, se procedió a realizar la configuración del sentido de giro de cada motor como se muestra en la Figura 3.23, obteniendo un cuadricóptero en configuración de X. Para cambiar la dirección de giro de un motor, basta solo con invertir posiciones de dos de las terminales tipo bala que conectan al motor con el ESC.

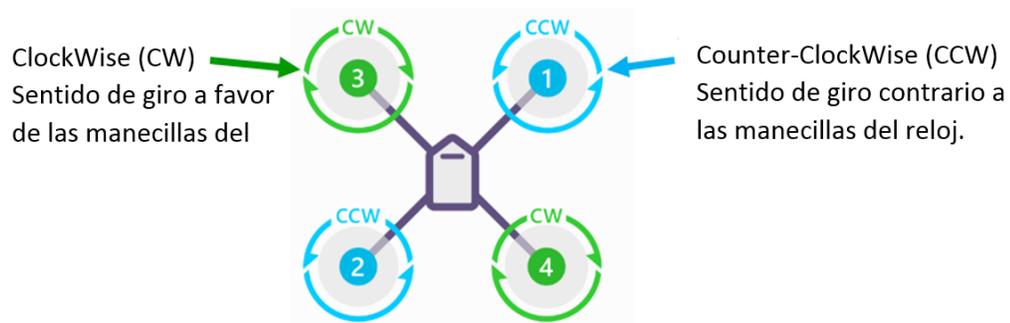


Figura 3.23 Sentido de giro de los cuatro motores para tener un drone en configuración de X.

Teniendo definido el sentido de giro en los motores, se procedió a la colocación de las hélices para lo cual fue necesario identificar el sentido de giro de cada hélice. La Figura 3.24 muestra dos tipos de hélices: en sentido horario (llamados empujadores) y en sentido anti horario (llamados tiradores). Lo más fiable es reconocer el tipo de hélice correcto por su forma. El borde más grueso es el borde de ataque que se mueve en el sentido de rotación. El borde de salida suele ser más delgado.

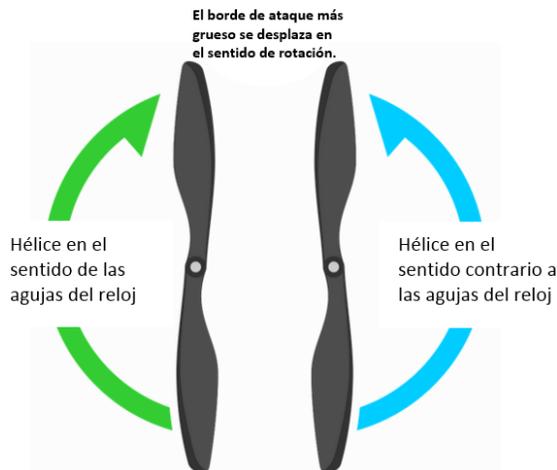


Figura 3.24 Identificación del sentido de giro en las hélices.

3.3.2.3 Sistema de navegación

La placa BBBlue cuenta con una unidad de medida inercial (IMU) de nueve ejes, la cual proporciona información sobre la velocidad, la orientación, la aceleración y la posición en tiempo real. La IMU está integrada por un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro. Al realizar una primera prueba de valoración, se observó que el magnetómetro presentaba afectación por la interferencia producida por alguna fuente, sin embargo, al no contar con la instrumentación necesaria no fue posible identificar exactamente la fuente de esa interferencia. No obstante, se observó que la afectación desaparecía al quitar la protección metálica que recubría la placa BBBlue. Esta protección fue instalada con el objetivo de proteger la placa BBBlue de posibles golpes, por lo tanto, retirarla implicaba poner en riesgo la BBBlue. Debido a la situación presentada, fue necesaria la incorporación de un magnetómetro externo. Se utilizó el módulo HMC5883L como magnetómetro externo, para lo cual fue necesario instalarlo en una posición específica del chasis, donde tuviera un correcto funcionamiento y además no estuviera expuesto a posibles daños por golpes en las pruebas de vuelo. La Figura 3.25 muestra la manera en la cual quedó instalado en el chasis.

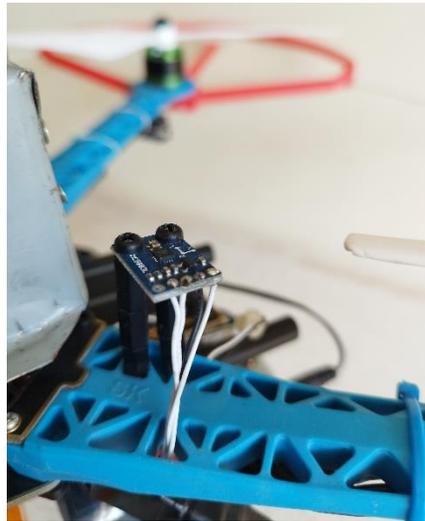


Figura 3.25 Módulo HMC5883L instalado en el frame.

La placa BBBlue también cuenta con un barómetro integrado, específicamente el sensor Bosch BMP280, el cual se utiliza principalmente para medir la presión atmosférica. Pero también proporciona información valiosa para ser utilizada en una variedad de situaciones como: indicador de altitud, predicción del tiempo, estimación de la velocidad vertical y compensación de la altitud. Sin embargo, se observó que las corrientes de aire producidas por las hélices de los motores, producían ciertas perturbaciones en las mediciones del barómetro, por lo que se le instaló una protección la cual absorbiera la energía propia de las corrientes de aire generadas por las hélices, para impedir que las mediciones se vieran afectadas. La protección básicamente consiste en una almohadilla de espuma de unos audífonos pegada a la placa BBBlue. La manera en la cual quedó instalada se muestra en la Figura 3.26.

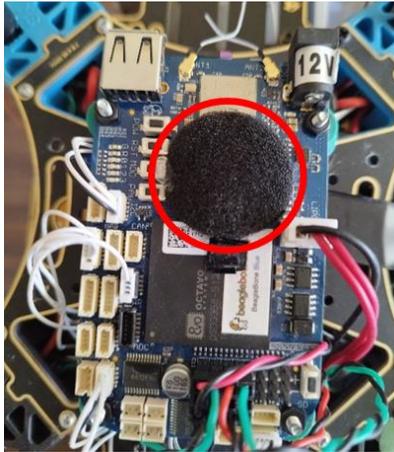


Figura 3.26 Protección del barómetro integrado en la placa BBBlue.

El sensor LIDAR TFmini-S es una solución de medición de distancia óptica, el cual puede ser utilizado en cualquier dirección. Sin embargo, en este proyecto se necesita tener una medición precisa de la distancia hacia el suelo, para que el dron tenga un dato preciso en el control de altura y así ayudar a cumplir varios objetivos del proyecto. Por lo cual, se colocó el sensor en la parte inferior de la estructura del dron, justo debajo del compartimento de la batería. Adicionalmente se le adaptó una protección para prevenir daños por posibles golpes en la realización de las primeras pruebas de vuelo. La Figura 3.27 muestra la manera en la cual quedó instalado el sensor.

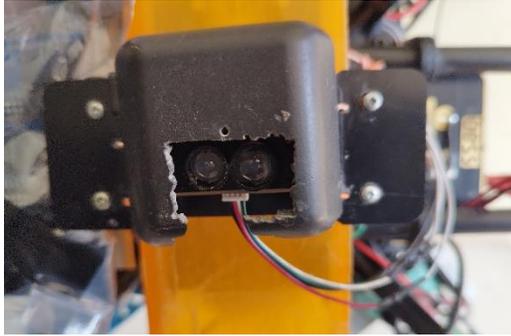


Figura 3.27 Sensor LIDAR TFmini-S montado en la parte inferior del dron.

El receptor GNSS es una herramienta de mucha importancia en un dron, ya que proporciona información vital para la navegación, el control de vuelo y la seguridad, así como para habilitar una variedad de funciones de vuelo específicas. Para realizar las primeras pruebas de vuelo se instaló el módulo GPS UBX M10050, el cual proporciona compatibilidad con los sistemas de satélites GPS, GLONASS, Galileo y Beidou. Además de que sus dimensiones son muy pequeñas, comparado con otros sensores, su precio de adquisición no es muy elevado por lo que si se dañaba en alguna prueba de vuelo no se tendría gran pérdida económica en el proyecto. La manera en la cual quedó instalado en el chasis se muestra en la Figura 3.28.



Figura 3.28 Modulo GPS UBX M10050 instalado en el chasis.

3.3.2.4 Sistema de control

La placa BBBlue es quien se encarga de realizar todo el procesamiento de señales, así como de ejecutar el control en los vuelos autónomos, por lo que su ubicación en el chasis es de suma importancia, porque tiene que estar al alcance de todos los elementos que se conectarán a ella. Por lo tanto, se colocó en el centro del chasis por la parte superior. Inicialmente se atornilló directamente al chasis, sin embargo, se observaron altos valores de vibración provocados por el funcionamiento de los motores, lo cual se solucionó montándola sobre unas bases fabricadas con gomas de plástico y tornillos para aminorar las vibraciones, como se puede ver en la Figura 3.29.

Teniendo integrada correctamente la placa BBBlue al chasis, se procedió a realizar todas las conexiones necesarias para el funcionamiento de todos los sensores y módulos correspondientes. La placa BBBlue tiene conectores hembra de tipo JST-SH, por lo cual se utilizaron los conectores macho JST-SH para cada conexión. La distribución de las conexiones en la placa BBBlue se muestra en la Figura 3.30.

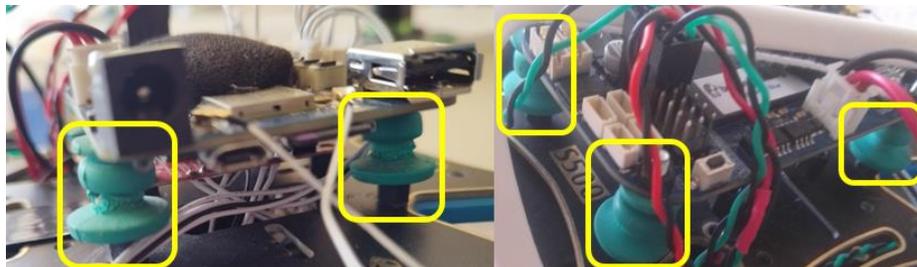


Figura 3.29 Bases construidas para evitar las vibraciones en la placa BBBlue.

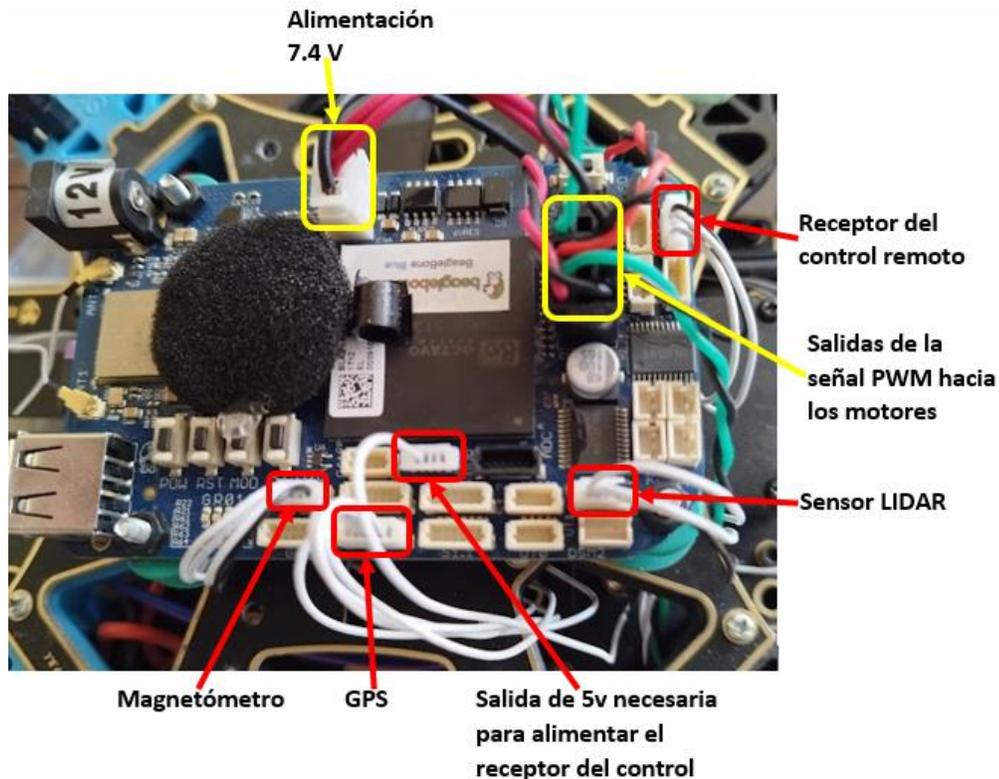


Figura 3.30 Descripción de las conexiones en la placa BeagleBone Blue.

3.3.2.5 Sistema de comunicación entre el dron y la estación de control en tierra.

La estación de control en tierra integrada por el programa Mission Planner instalado en la computadora personal, necesita tener constante comunicación bidireccional con la controladora de vuelo (BBBlue), para poder estar monitoreando todo el tiempo al dron y así mismo darle órdenes de ejecución en caso de ser necesario. Para lo cual, por cuestiones de presupuesto, se utilizó un módem EchoLife HG8245Q2 con el que se contaba en el departamento de Maquinaria Agrícola de la UAAAN. La comunicación se realizó por medio del protocolo UDP (*User Datagram Protocol*); este protocolo permite el envío rápido de paquetes de datos en redes IP conocidas. El módem asigna, por el servicio de DHCP, una dirección IP que puede cambiar en cada asignación, y si esto sucede no se establece la comunicación UDP. Por tal motivo se asignó una dirección IP fija a la estación de control en tierra. Además,

se le adaptó una batería Lipo de tres celdas como fuente de alimentación, para poder transportarlo a cualquier parte que se requiriera para fines de pruebas del dron.

3.3.2.6 Sistema de radio control

Como ya se mencionó, se realizó la adaptación del receptor de un radio control antiguo Turnigy de 9 canales, para poder tener comunicación con la BBBlue mediante señal PPM, con ayuda del Arduino Mini Pro, adaptado dentro del mismo espacio del receptor, como se puede ver en la Figura 3.31.

El transmisor de radio cuenta con nueve canales, de los cuales solo se utilizaron ocho, cuatro designados a roll, pitch, yaw y throttle, así mismo se asignaron los modos de vuelo automático, mantener altura, mantener posición y aterrizar a cuatro de los canales restantes. El modo en el cual quedaron configurados los canales se muestra en la Figura 3.32.

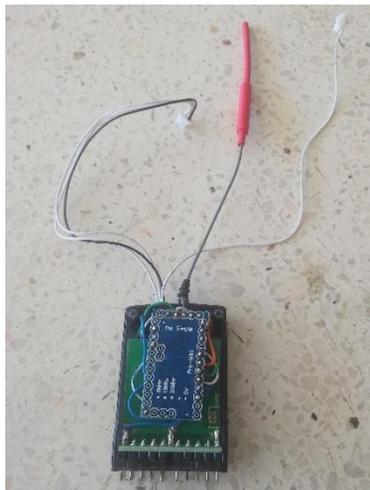


Figura 3.31 Adaptación del receptor a señal PPM.



Figura 3.32 Configuración de los canales del radio control.

3.3.2.7 Sistema de corrección RTK

En la agricultura de precisión se requiere de una ubicación geográfica lo más precisa posible, permitiendo así una obtención de datos georreferenciados más precisos para optimizar la gestión de los cultivos. Para que el dron tuviera una precisión menor a 10 cm en su ubicación geográfica, se construyó un sistema de corrección RTK conformado por una estación base RTK y una estación móvil (rover). Para la construcción de la estación base se utilizó el GPS-RTK2 con el módulo ZED-F9P-02B-00, el módulo TTGO con ESP32 y pantalla, un módulo Digi XBee SX 868 con sus componentes, una batería Lipo de dos celdas, una antena multibanda AS-ANT2B-SUR-L1L2-25SMA-00 y LED's indicadores. Por su parte, para la construcción de la estación móvil se utilizó el GPS-RTK2 con el módulo ZED-F9P-02B-00, un módulo Digi XBee SX 868 con sus componentes y una antena Taoglas Magma AA.171. Para realizar pruebas de funcionamiento del sistema de corrección RTK se montaron provisionalmente todos los componentes, tanto de la base como del rover en unas protoboards, como se muestra en la Figura 3.33.

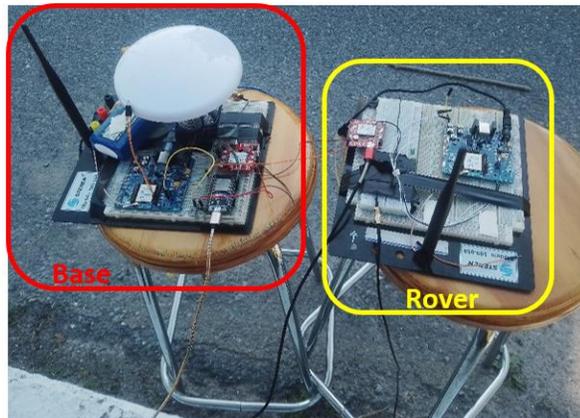


Figura 3.33 Sistema de corrección RTK en la fase de pruebas.

Después de realizar pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de todo el sistema de corrección RTK, tanto en la estación base como en la estación móvil, se procedió a incorporar todos los componentes en sus respectivos espacios. Los

componentes de la estación base se montaron en una caja contenedora de circuitos electrónicos de 18 cm x 11 cm x 6 cm, como se muestra en la Figura 3.34. Además, se adaptó una base de micrófono para colocar la antena multibanda AS-ANT2B-SUR-L1L2-25SMA-00 y la caja con todos los elementos como se puede apreciar en la Figura 3.35. Los componentes de la estación móvil se incorporaron a la estructura del dron, quedando la colocación de cada módulo como se muestra en la Figura 3.36. Adicionalmente, debido a la alta sensibilidad a la estática por parte del módulo XBee, se le colocó una bolsa anti estática para evitar contacto con el polvo levantado por el movimiento de las hélices, durante los despegues y aterrizajes.

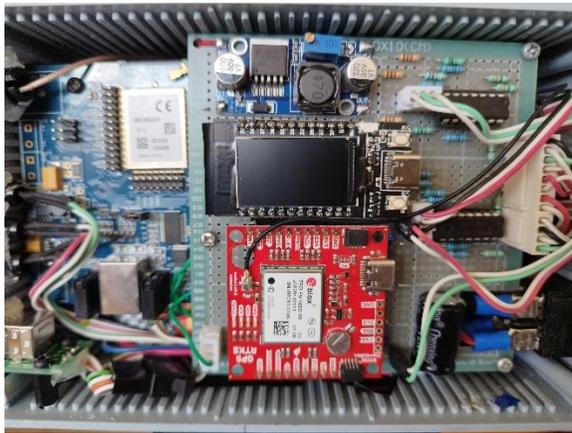


Figura 3.34 Montaje de todos los módulos de la estación base RTK.



Figura 3.35 Estación base RTK.



Figura 3.36 Estación móvil RTK (rover) instalada en el dron.

3.3.2.8 Protecciones de hélices y placa BBBlue.

En un principio se decidió incorporar una protección a la placa BBBlue, la cual por su ubicación en el frame podría sufrir daños en alguna caída. Sin embargo, al estar realizando los vuelos de calibración de ganancias, el dron se estrelló en varias ocasiones provocando daños en las hélices, por lo que se decidió incorporarles protecciones a las hélices. Las Figuras 3.37 y 3.38 muestran la manera en la cual quedaron constituidas.



Figura 3.37 Caja de protección para la placa BBBlue.



Figura 3.38 Protecciones de las hélices.

3.3.3 Calibración de ganancias y pruebas de vuelo

Para que el dron pueda realizar un vuelo en modo automático, se requiere que el sistema sea capaz de operar en las modalidades “mantener altura” y “mantener posición”. Esto debido a que el modo “automático” incorpora el control de altura desde el modo “mantener altura” y el control de posición desde el modo “mantener posición”. Por lo cual es necesario realizar una calibración de las ganancias que intervienen en cada uno de esos modos de vuelo. El control automático de la altura que realiza ArduPilot se muestra en la Figura 3.39. El cual, intenta igualar el dato de altura proveniente de los sensores a una altura objetivo, establecida en los modos de vuelo donde intervenga el control de altura, es decir que el error (diferencia entre los dos) sea cero. En la primera etapa del control, la ganancia P es utilizada para convertir el

error de altitud en una tasa de ascenso o descenso deseada. En la segunda etapa las ganancias PID correspondientes a la velocidad del acelerador, convierten la velocidad de ascenso o descenso deseada en una aceleración deseada hacia arriba o hacia abajo. Por último, las ganancias PID de aceleración del acelerador, convierten el error de aceleración en una salida para cada motor.

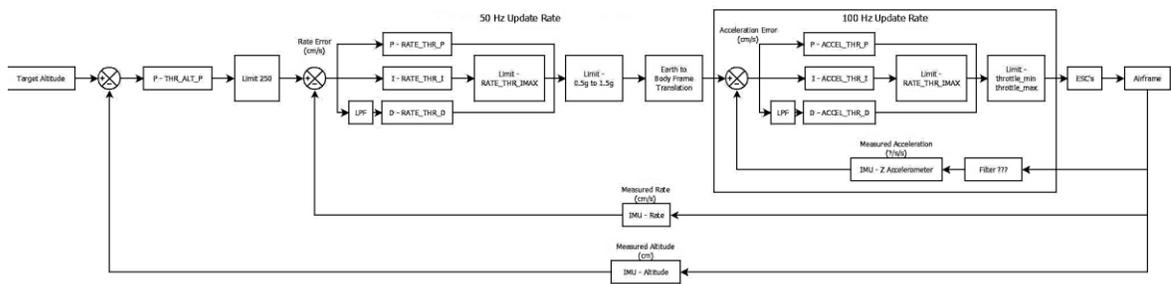


Figura 3.39 Diagrama de control altura PID del piloto automático ArduPilot. (ArduPilot Dev Team, 2023).

En el diagrama de la Figura 3.40 se muestra como se obtiene el valor final del estado de la altitud (z) en el control de altura. En el primer subsistema se utiliza el filtro de Kalman extendido, también conocido como EKF (*Extended Kalman Filter*). El cual permite estimar el estado de un sistema no lineal a partir de mediciones ruidosas y modelos no lineales. El subsistema EKF es responsable de generar estimaciones de orientación, velocidad, posición y altitud del dron, para que los sistemas de navegación y control puedan funcionar correctamente. El EKF toma las entradas de los sensores de IMU, GNSS, Barómetro, LIDAR y las integra para proporcionar estas estimaciones, una de las cuales es la altitud estimada. Luego este dato se envía al sistema de control de altitud, el cual lo intenta igualar a la altura objetivo. Sin embargo, cuando se tiene un sensor LIDAR orientado hacia el suelo y la altura del dron está dentro del rango de alcance del sensor, entonces, se intenta igualar la altura objetivo dándole mayor

prioridad a las mediciones del sensor LIDAR, no obstante, la altitud estimada todavía es utilizada para ajustar las salidas de control.

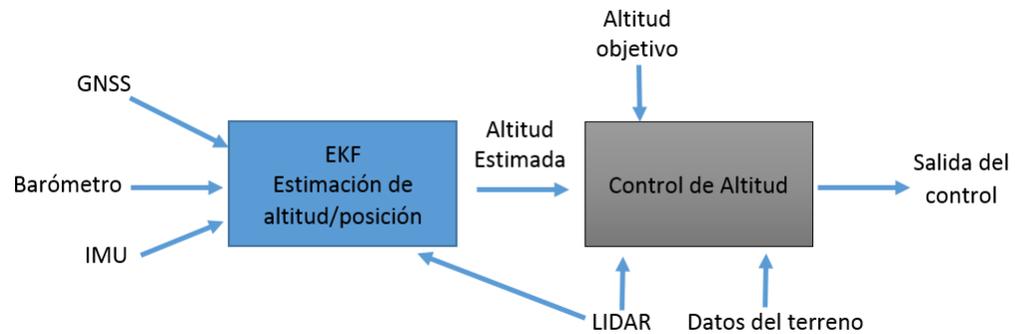


Figura 3.40 Diagrama de explicación de los datos del control de altura. (ArduPilot Dev Team, 2023).

El objetivo del primer vuelo consistía en lograr que el dron se mantuviera en el aire sin caerse, lo cual se logró sin realizar ningún cambio en las ganancias PID, sin embargo, se observaron respuestas con oscilaciones por parte del dron al realizar cambios bruscos en la dirección de cada ángulo. Por lo que se procedió a realizar una calibración fina de las ganancias PID del modo estabilizado. Como primer paso se realizó la calibración de las ganancias PID de roll, pitch y yaw para poder tener una estabilización en estos ejes. Realizando para ello, primeramente, incrementos en las ganancias P y D del 50% hasta que se observaran oscilaciones sin realizar cambios en la dirección de cada ángulo, para después reducir las ganancias P y D en pasos de 10% y de ser necesario ajustar incrementos del 10% en la ganancia I, hasta que pudiera mantenerse en vuelo estable sin que se puedan detectar oscilaciones al realizar un cambio brusco en los ángulos de roll, pitch y yaw.

Posteriormente se procedió a realizar la calibración de la ganancia P en el mantenimiento de altitud. Se utilizó la misma técnica mencionada anteriormente utilizando incrementos del 50% y disminuciones de 10%, hasta obtener resultados deseados reduciendo a cero la diferencia entre la altura objetivo y la altura obtenida.

Por último, se realizó la calibración de las ganancias P de la posición en X y Y del dron y PID de la velocidad en X y Y, para mantener un control en la ubicación y el rumbo del dron. De igual manera se manejaron incrementos en las ganancias del 50% y disminuciones del 10% hasta obtener resultados deseados, controlando la ubicación y el rumbo sin presentar oscilaciones.

3.3.3.1 Vuelos de prueba en modo automático

Una vez teniendo calibradas todas las ganancias y habiendo realizado vuelos satisfactorios en los modos de vuelo mantener altura y mantener posición, se procedió a realizar vuelos en modo automático, por medio de misiones construidas en Mission Planner. El procedimiento general seguido para la planificación y realización de una misión se describe a continuación:

1. Definir el objetivo de la misión: Determinar que se quiere lograr con el vehículo no tripulado. Esto puede ser desde un simple vuelo de reconocimiento hasta un mapeo detallado de un área o la recolección de datos específicos.
2. Seleccionar el área de operación: identificar el área geográfica en la que se llevará a cabo la misión mediante mapas detallados de la misma y de ser posible, visitas presenciales al área específica.
3. Configurar el vehículo: Utilizar Mission Planner para configurar el vehículo, incluyendo la calibración de los sensores, la configuración de los modos de vuelo y la verificación de que todo esté en condiciones óptimas.
4. Planificar la ruta de vuelo: Utilizar las herramientas de planificación de misiones en Mission Planner para definir waypoints (puntos de control), trayectorias y áreas de interés en el mapa. Esto puede implicar seleccionar puntos específicos en el mapa que el vehículo debe visitar, así como establecer altitudes y velocidades de vuelo.
5. Revisar y ajustar la misión: Revisar cuidadosamente la ruta de vuelo para asegurar que cumpla con los requisitos de la misión y sea segura.

6. Simulación: Utilizar la función de simulación en Mission Planner para simular la misión antes de realizarla en el mundo real. Esto puede ayudar a identificar posibles problemas o errores en la planificación de la misión.
7. Cargar la misión en el vehículo: Una vez realizada con éxito la planificación de la misión, se requiere cargar la misión en el vehículo.
8. Ejecutar la misión: Para iniciar la misión, se debe activar el modo de vuelo automático en el radiocontrol y acelerar un poco. Posteriormente llevar a cabo la misión según lo planificado, monitoreando el progreso y asegurando estar preparado para intervenir en caso de cualquier problema inesperado.
9. Analizar los datos: Después de completar la misión, utilizar Mission Planner para extraer los datos guardados en los registros de vuelo, para posteriormente poder analizar los datos en cualquier software de análisis de datos y evaluar el rendimiento general de la misión.

La primera misión objetivo consta de dos puntos de control: en uno despegar y alcanza una altura aproximada de 3 metros, después se dirige al segundo punto conservando la misma altura, al llegar a ese punto se detiene y procede a aterrizar. Cumpliendo esta misión de manera satisfactoria se procedió a incorporar más puntos de control hasta llegar a una misión más compleja, en donde sobre determinado punto de control tenía que cumplir la tarea específica de aterrizar, esperar un tiempo determinado y volver a despegar para continuar con la misión.

Finalmente se realizó una misión en la que el dron tenía que realizar nueve veces la tarea específica descrita anteriormente, con el objetivo de poder medir la precisión del aterrizaje con la corrección RTK. Para lo cual se marcaron previamente los puntos de aterrizaje en la zona específica donde se realizaría la misión. Además, se tomó la coordenada con el sistema de corrección RTK activo de cada punto marcado, para que se correspondiera con cada punto de control de la misión respectivamente. Así mismo, se ajustaron diferentes parámetros necesarios para la misión, como un segundo de espera en cada aterrizaje, la altura y velocidad de vuelo, entre otros. La imagen 3.41 muestra una representación visual de la misión con las coordenadas de

cada punto de control. Finalmente se cargó la misión en la placa BBBlue para realizar su ejecución en el campo de pruebas. Después de completar la misión se procedió a extraer los datos para el análisis y poder determinar la precisión con la que aterrizaba el dron en cada punto.

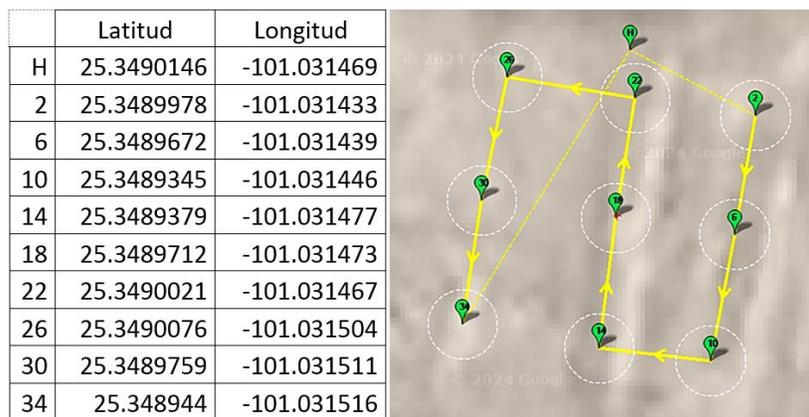


Figura 3.41 Coordenadas de cada punto de la misión final.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en los vuelos de prueba realizados, con el objetivo de comprobar el desempeño de la aeronave. Adicionalmente se presentan los resultados del funcionamiento del sistema de corrección RTK. Las pruebas de vuelo se realizaron bajo las condiciones climáticas que se presentaban en el día de la prueba, sin embargo, se buscaban días donde se presentara poca velocidad del viento (menor a 12 kmh^{-1}) y cielo despejado, para aminorar las perturbaciones en el control del dron. En los modos de vuelo en los que el control de altitud debe activarse mediante el radiocontrol, los datos de la altura siempre son aproximados. Esto debido a que nunca se sabe la altitud exacta a la que se activó el control de altitud.

Para poder analizar los datos de cada vuelo realizado, ArduPilot crea de forma predeterminada un registro de los datos del vuelo, conocidos como Dataflash logs, los cuales se almacenan en la memoria microSD de la controladora de vuelo. Por lo que después de cada vuelo se descargaron los registros Dataflash en la estación de control en tierra, para poder hacer un diagnóstico y solucionar cada problema presentado.

4.1 Prueba de vuelo para la calibración de las variables roll, pitch y yaw.

La primera prueba de vuelo se realizó con los valores de las ganancias PID que por defecto proporciona ArduPilot para un cuadricóptero, los cuales se muestran en el cuadro 4.1. Debido a la evaluación del primer vuelo se decidió ajustar los parámetros de las ganancias PID antes de volver a despegar. Como ya se describió en el capítulo anterior, se realizaron cambios a las ganancias PID varias veces hasta obtener los

resultados deseados, el resultado de estos cambios se puede ver en el cuadro 4.1. Se observa que los valores finales de las ganancias son más grandes que los valores por defecto que proporciona ArduPilot. Esto debido a que el dron es relativamente pesado en proporción a la propulsión de los motores, por lo tanto, necesita más potencia, lo que está directamente relacionado con la ganancia P. También por el mismo incremento de peso, presenta mayor inercia, por lo que se ve afectada la velocidad y aceleración del error, provocando incrementos en las ganancias ID. También se puede ver que las ganancias por defecto de roll y pitch son exactamente iguales, sin embargo, al final las ganancias de estos dos ángulos son totalmente diferentes. Lo anterior debido a que el dron tiene más peso en el eje de movimiento del ángulo pitch que en el eje del ángulo roll, por lo que hay más exigencia en las correcciones del ángulo pitch. Por último, la ganancia D en el ángulo yaw por defecto tiene un valor de cero y al final se conservó el mismo valor, considerando que usualmente en un control PID del ángulo yaw, la omisión del término derivativo se usa como una medida para mejorar la estabilidad, dado que el componente derivativo amplifica las altas frecuencias.

Cuadro 4.1 Valores de las ganancias PID del control en las variables roll, pitch y yaw, antes y después de la calibración.

	Ganancias por defecto			Ganancias finales		
	P	I	D	P	I	D
Roll	0.135	0.135	0.0036	0.15375	0.15375	0.00405
Pitch	0.135	0.135	0.0036	0.2306	0.2306	0.006075
Yaw	0.18	0.018	0	0.54	0.054	0

La Figura 4.1 muestra la comparación de los datos del roll deseado (DesRoll) y el obtenido por el control (Roll), después de la calibración de las ganancias PID. Se puede observar que el roll deseado no se encuentra en un valor estático, sino que, se encuentra oscilando en valores dispersos entre positivos y negativos, lo que indica los movimientos que se realizaron en el eje roll por parte del radio control, con la finalidad de ver la respuesta a las perturbaciones. También se aprecia que la señal del roll

obtenido trata de seguir el comportamiento del roll deseado con poco error, lo que indica que existe una buena calibración de las ganancias PID.

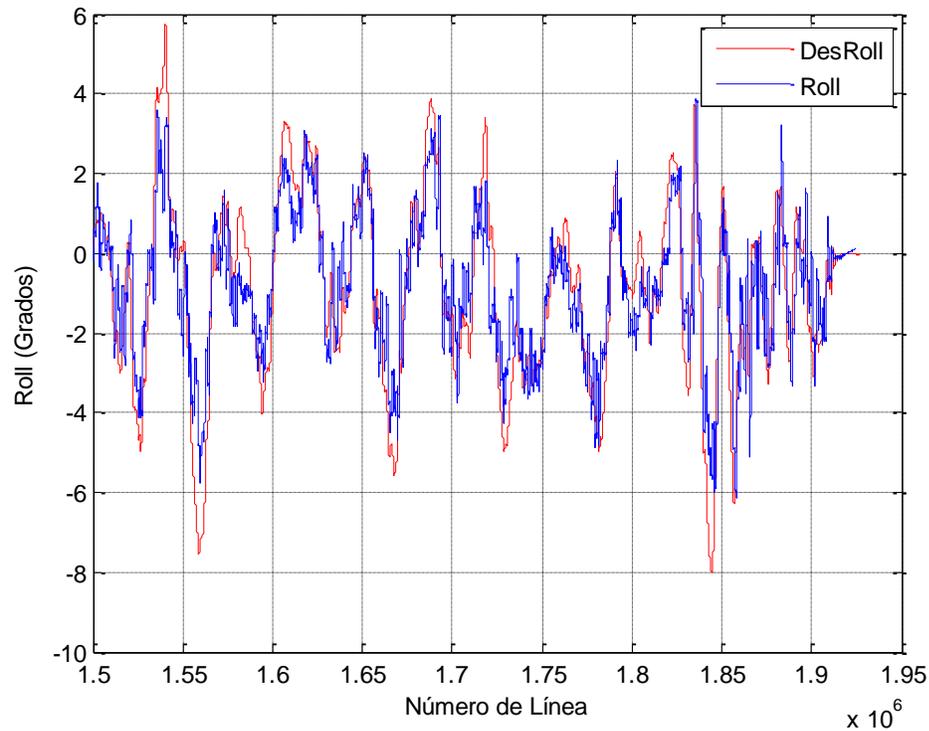


Figura 4.1 Gráfica de Roll deseado y Roll obtenido, después de la calibración de las ganancias PID.

En la Figura 4.2 se representa de manera gráfica la comparación de los datos del pitch deseado (DesPitch) y el obtenido por el control (Pitch), en un vuelo de prueba después de realizar la calibración de las ganancias PID. Se observa como los valores de las dos variables presentan oscilaciones, esto representa los movimientos realizados en este ángulo. Sin embargo, a pesar de estos movimientos el valor del pitch obtenido por el control, trata de seguir el comportamiento del pitch deseado con poco error. Lo cual indica que existe una buena calibración de las ganancias PID.

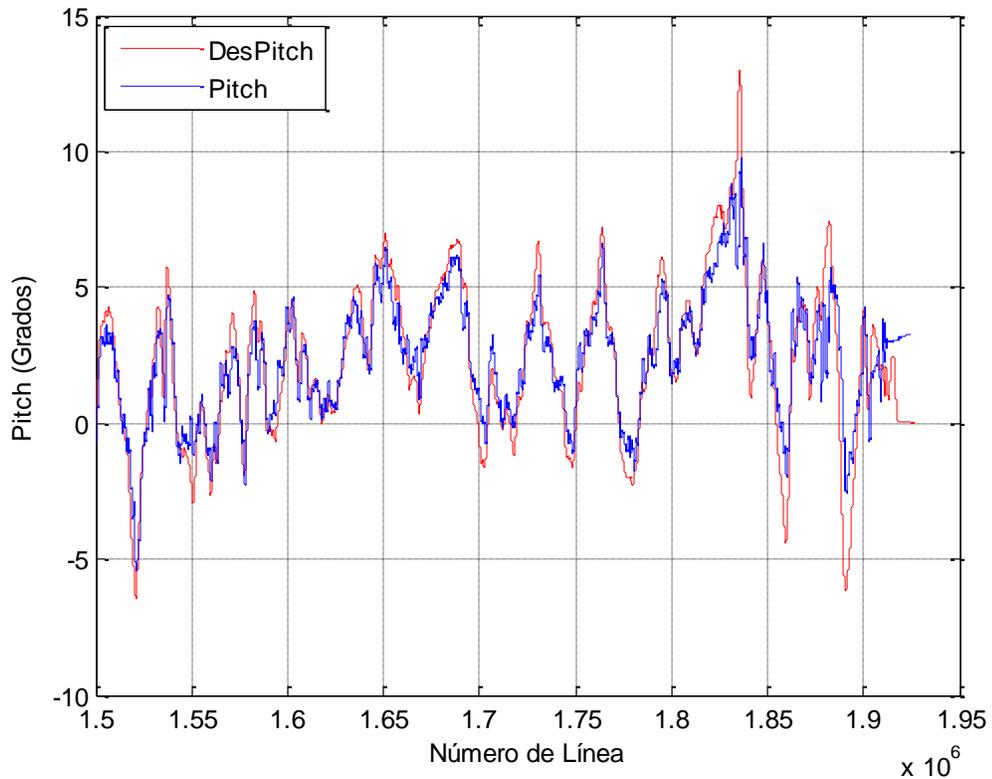


Figura 4.2 Gráfica de *Pitch* deseado y *Pitch* obtenido, después de la calibración de las ganancias PID.

En la Figura 4.3 se muestra la gráfica de los datos de un vuelo de prueba realizado después de la calibración de las ganancias PID, en la cual se presenta una comparación del yaw deseado (DesYaw) y el obtenido (Yaw). Visualmente se puede apreciar que los valores del yaw obtenido, se encuentran justo sobre los valores del yaw deseado, durante toda la prueba. Lo cual indica que el valor del yaw obtenido es casi exactamente igual al valor deseado, y a pesar de que se realizan varios movimientos bruscos en este ángulo, sigue teniendo el mismo comportamiento. Por lo tanto, se puede afirmar que en el eje del ángulo yaw se tiene un control muy fino. Esto no se pudo lograr en los ángulos de roll y pitch, ya que ambos afectan la inclinación del dron, pero en diferentes planos respectivamente. Por lo que requieren respuestas más rápidas del sistema de control PID para mantener el dron estable,

especialmente en condiciones de viento o durante maniobras rápidas. En cambio, las correcciones en el ángulo yaw, no afectan directamente la estabilidad vertical del dron y pueden ser menos sensibles a perturbaciones rápidas, comparadas con los ángulos roll y pitch.

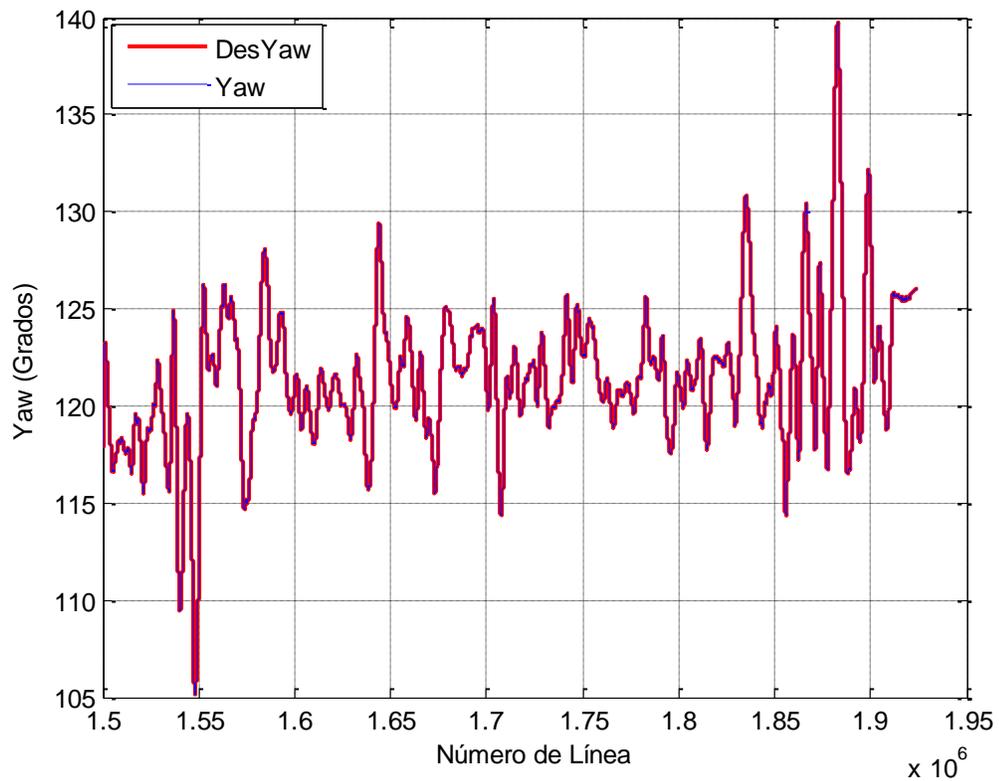


Figura 4.3 Gráfica del Yaw deseado y el Yaw obtenido, después de la calibración de las ganancias PID.

4.2 Prueba de vuelo para la calibración de ganancia P y el parámetro THR_DZ en el control de altitud.

La Figura 4.4 muestra los datos obtenidos por los sensores en un vuelo de prueba, para ver el comportamiento del control al intentar mantener la altitud. Antes de la calibración de la ganancia P y el parámetro THR_DZ del control de la altitud, con un valor de $P = 1$ y $THR_DZ = 100$. El parámetro THR_DZ (THRottle DeadZone) indica la zona muerta por encima y por debajo de la posición media del acelerador, cuyo valor está dado en microsegundos de PWM. DAlt representa la altura deseada, Alt la altura obtenida en el sistema mediante el EKF, BAlt la altura proporcionada por el barómetro, DisRFN la altura indicada en el sensor LIDAR y Mode representa el modo de vuelo activado desde el control remoto. Para obtener el valor final de la altura, primero el EKF integra los datos proporcionados por los sensores para generar un dato de altura estimada. Después el control de altura recibe este dato, lo compara con el valor deseado y decide que acción tomar para corregir cualquier desviación.

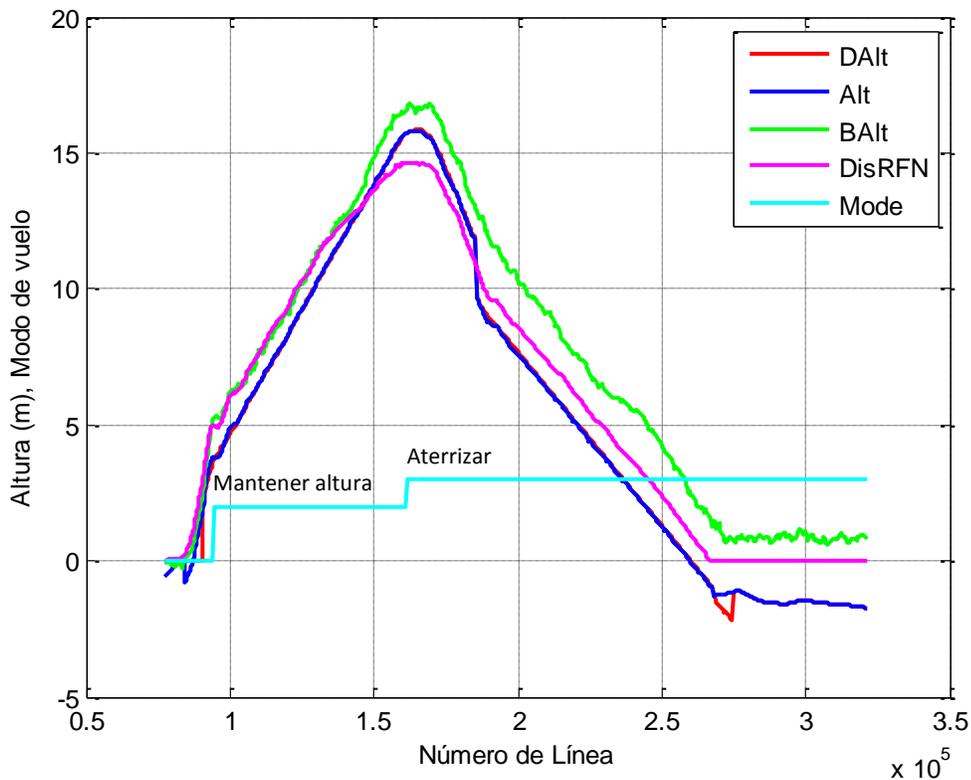


Figura 4.4 Gráfica de los datos del vuelo de prueba para mantener la altitud, antes de la calibración de la ganancia P y el parámetro THR_DZ en el mantenimiento de la altitud.

Se puede observar en la Figura 4.4 que la altura obtenida por el sistema tiene prácticamente el mismo comportamiento que la altura deseada, también se puede apreciar que la altura medida por el barómetro es la que se encuentra más dispersa de las demás, debido a que utiliza la presión atmosférica para determinar la altura, por lo tanto, es más impreciso, además de la propia imprecisión del barómetro. La representación de los valores de Mode con respecto a los modos de vuelo, se puede observar el cuadro 4.2. Con esta referencia, se puede ver en la Figura 4.4 que el modo de vuelo al momento de despegar se encuentra en el valor de cero, lo cual indica que está en el modo “estabilizar”. Después, al alcanzar una altura aproximada de cuatro metros, el valor de Mode cambia a dos, lo que en teoría indica la activación del modo de “mantener altitud”. Sin embargo, el dron no retiene esa altura, si no que continúa su ascenso hasta llegar a una altura aproximadamente de 15 m. Se dejó llegar hasta esa altura esperando que el dron mantuviera en algún momento la altura, pero al ver que no se tenía una respuesta favorable, se indicó desde el radiocontrol la activación del modo aterrizaje. Como se puede ver, el valor de la altura deseada no se mantiene estático después de activar el modo de vuelo correspondiente, sin embargo, el control trata de llevar la diferencia entre la altura deseada y la altura del sistema, a cero. Esto indica que la parte del sistema de control de la altura está funcionando relativamente bien, sin embargo, en ningún momento se mantiene estática la altura deseada, a pesar de que se dió la indicación desde el radiocontrol. Lo anterior es debido a el parámetro THR_DZ, por el cual el modo de vuelo de retención de altura será activado solo si la palanca del acelerador esta un rango del 40% al 60%. Sin embargo, debido al peso del dron, para poder despegar se lleva el acelerador arriba del 50%. Por lo cual, para poder alcanzar una altura considerable de 2 m, se excede del 60%. De lo anterior, se concluye que es necesario calibrar el parámetro THR_DZ para poder mantener la altura deseada estática al activar el respectivo modo de vuelo.

Cuadro 4.2 Representación del valor de Mode con respecto a los modos de vuelo.

Mode	Modo de vuelo
0	Estabilizado
1	Automático
2	Mantener altura
3	Aterrizar
4	Mantener posición

En la Figura 4.5 se puede ver la representación gráfica de los datos obtenidos por los sensores de la altura, en un vuelo de prueba después de realizar la calibración de la ganancia P y el parámetro THR_DZ en el control de la altitud, como se describe en el apartado 3.3.3. Obteniendo un valor final establecido de la ganancia P = 2 y THR_DZ = 200. De la misma manera la referencia de los valores de Mode se describen en el cuadro 4.2. Esta referencia permite entender en la Figura 4.5 que el dron despegue en el modo de vuelo “estabilizado” hasta alcanzar una altura aproximada de tres metros, donde es activado desde el radiocontrol el modo de vuelo para mantener la altitud. Después de activar este modo de vuelo, se puede ver como la altura deseada, se mantiene en un solo valor hasta que el modo de vuelo es cambiado. Durante este tiempo el control trata de llevar la altura obtenida del EKF, la cual considera la real (Alt), al valor de la altura deseada (Dalt). Finalmente, Mode cambia a un valor de tres, lo que representa que se activó desde el radiocontrol el modo de vuelo para aterrizar, por lo que el dron comienza el aterrizaje. Se puede apreciar al observar la altura deseada, que el aterrizaje tiene un perfil de velocidad (descenso) deseado, cuyo valor es de 2.5 m/s. El cual se puede modificar con el parámetro PILOT_SPEED_DN. De lo anterior podemos deducir que ahora ya existe un buen control de altura en el dron, pues al activar el modo de vuelo mantener altura desde el radiocontrol, el dron mantiene la altura a la cual se encontraba cuando se activó ese modo de vuelo. Manteniendo la altura con un error promedio de 3 cm cuando se encuentra activo el control de altura. No obstante, se puede observar que al final del aterrizaje, el valor de

la altura deseada se va a los valores negativos. Debido a que, cuando el dron se encuentra en el suelo está fuera del rango de alcance del sensor LIDAR (15 cm – 1100 cm), por lo que en ese momento los datos de este sensor no son tomados en cuenta por el EKF, considerando únicamente los datos de los demás sensores. Se puede apreciar como el valor de BAlt al momento de estar el dron en el suelo, tiene un pico hacia arriba de algunos centímetros, provocando que la altura deseada intente compensar esos valores.

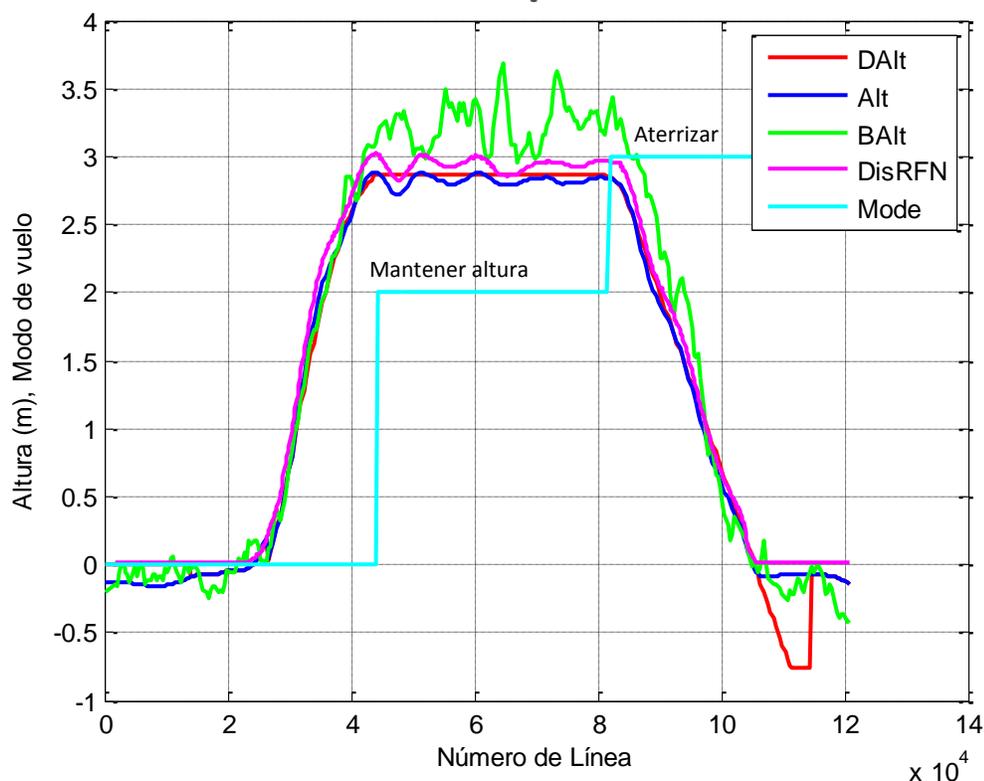


Figura 4.5 Gráfica de los datos del vuelo de prueba para mantener la altitud, después de la calibración de la ganancia P y el parámetro THR_DZ en el mantenimiento de la altitud.

4.3 Prueba de vuelo para la calibración de las ganancias P de la posición en X y Y del dron y PID de la velocidad en X y Y.

La gráfica (a) en la Figura 4.6 representa los datos de latitud, mientras que la gráfica (b) indica los datos de longitud, durante un vuelo de prueba antes de calibrar las ganancias de la posición y velocidad en X y Y; teniendo las ganancias unos valores iniciales de: $P = 1$ en la posición (X,Y) y $P = 1$, $I = 0.5$, $D = 0.3$ en la velocidad (X,Y). En la gráfica (c), Alt representa el valor de la altura durante esta prueba, mientras que Mode muestra el modo de vuelo activado desde el radio control, teniendo como referencia los valores descritos en el cuadro 4.2. Se puede ver como el dron despegue en el modo de vuelo “estabilizado” hasta alcanzar una altura aproximada de 4 m, en donde es activado el modo de vuelo “mantener la altura”. Después se activa el modo de vuelo para mantener la posición en la que se encuentra el dron. Sin embargo, se observa que los valores de latitud y longitud siguen variando, aunque tratan de conservar un valor, se presenta mucha oscilación. Por lo que se decide activar desde el radiocontrol el modo de aterrizaje, para proceder a realizar una calibración de las ganancias mencionadas. De lo anterior, se puede decir que, en ese momento, no existe un buen control en el control de la posición, por lo que es necesario la calibración de las ganancias correspondientes.

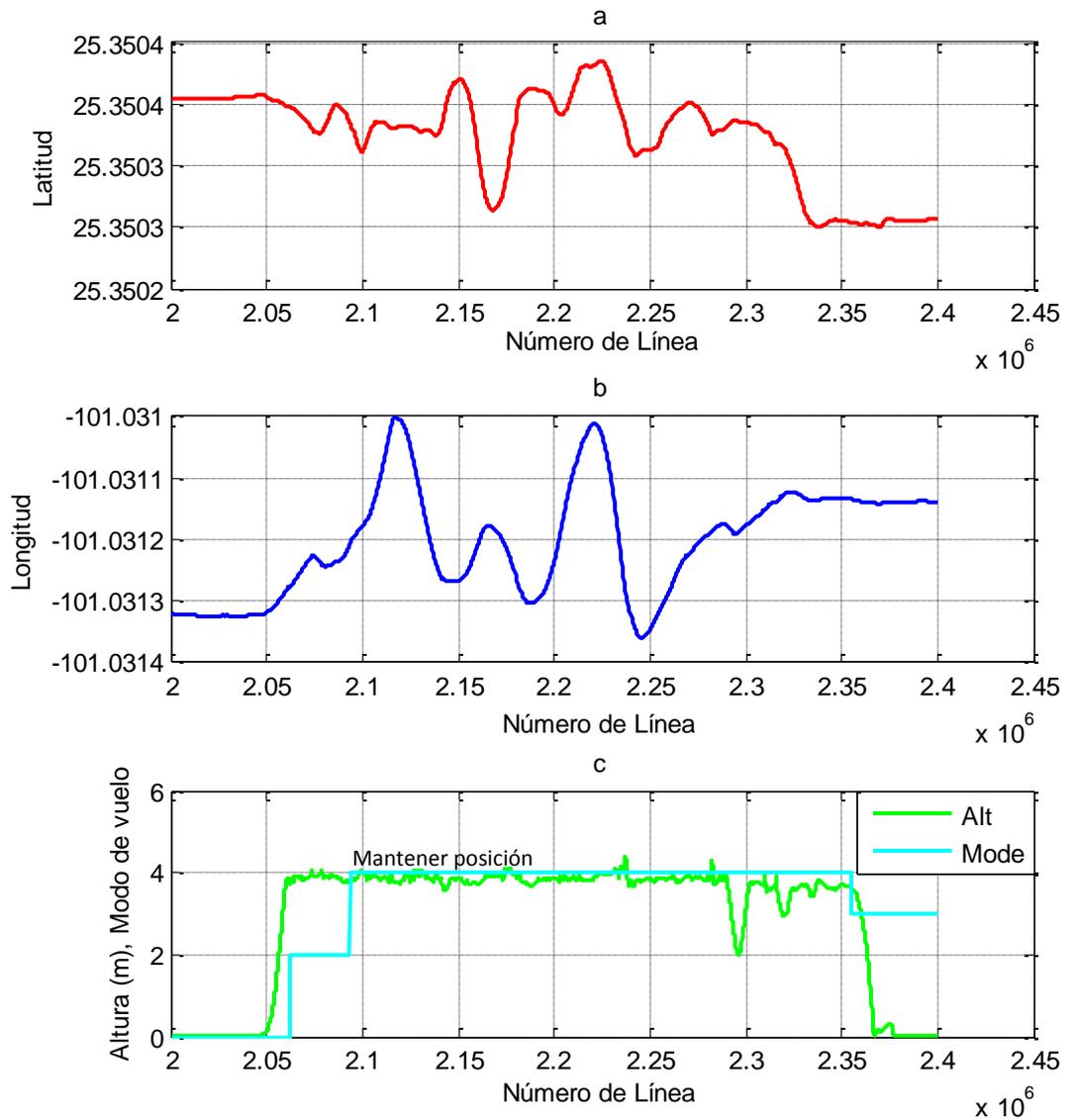


Figura 4.6 Gráficas de los datos obtenidos en un vuelo de prueba para mantener la posición en X y Y, antes de la calibración de la ganancia P de la posición en X y Y del dron y PID de la velocidad en X y Y.

La Figura 4.7 muestra los datos de la latitud, longitud, altura y el modo de vuelo durante un vuelo de prueba para mantener la posición, después de la calibración de las ganancias descrita en el apartado 3.3.3; teniendo unos valores finales de: $P = 2$ en la posición (X,Y) y $P = 2$, $I = 1$, $D = 0.5$ en la velocidad (X,Y). De igual manera la referencia de los valores de Mode con respecto a los modos de vuelo, se describen en el cuadro 4.2. Considerando esta referencia, se puede ver en la Figura 4.7 que el dron despegó en el modo de vuelo estabilizado, hasta alcanzar una altura aproximada de dos metros y medio. Donde se da la indicación desde el radiocontrol para cambiar al modo de vuelo de “control de altura” y después se cambia al modo de “control de posición”. Durante este tiempo en el cual Mode se mantiene en el valor de 4, es decir, en el modo de “control de posición”, se puede ver que tanto la latitud como la longitud tienden a mantenerse en un solo valor, lo que nos indica que ahora el dron está tratando de mantener la posición con un error menor que antes de la calibración en (X,Y). Pero también en Z tiene este comportamiento, pues se puede ver como los datos de la altura tratan de conservar un mismo valor. Por lo tanto, se puede afirmar que después de la calibración de las ganancias P de la posición en X y Y del dron y PID de la velocidad en X y Y, se logró tener un buen mantenimiento de la posición, con un error promedio de 14 cm en (X,Y) y 5 cm en Z. El error promedio en el plano (X,Y) es mucho más grande que el error en Z, esto debido a que mantener un control sobre la altura es generalmente más fácil que mantener un control preciso sobre el plano (X,Y). Esto se debe a la precisión y estabilidad de los sensores de la altura, la simplicidad relativa del modelo de control de altura y la menor influencia de factores ambientales en el eje vertical. Por otro lado, el control preciso de la posición horizontal es más desafiante, debido a la mayor complejidad de los sensores y modelos requeridos, así como a la influencia significativa de factores externos como el viento.

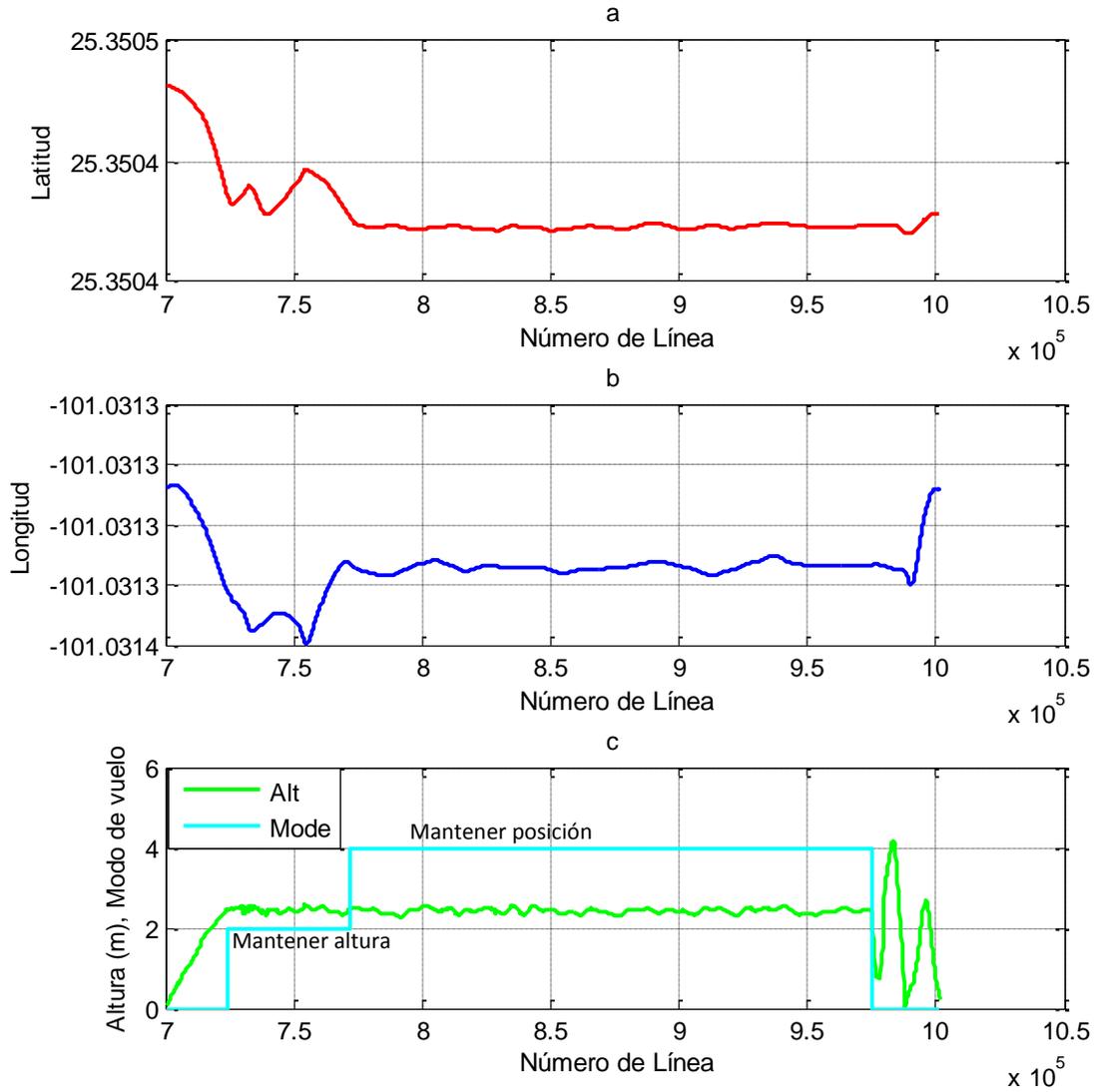


Figura 4.7 Gráficas de los datos obtenidos en un vuelo de prueba para mantener la posición en X y Y, después de la calibración de la ganancia P de la posición en X y Y del dron y PID de la velocidad en X y Y.

4.4 Prueba de un vuelo automático con una misión de dos puntos de control.

En la Figura 4.8 se muestra la representación gráfica de los datos obtenidos durante el primer vuelo automático realizado. El cual consta de una misión con solo dos puntos de control, en uno realiza el despegue hasta alcanzar una altura programada de 4.5 m, después, manteniendo la altura se dirige al segundo punto dónde finalmente aterriza. La referencia de los valores de Mode con respecto a los modos de vuelo se muestra en el cuadro 4.2. Contemplando lo anterior, se puede ver en la gráfica (c) de la Figura 4.8 que el dron se encuentra en el modo de vuelo “estabilizado” cuando está en reposo. Sin embargo, es cambiado al modo de vuelo “automático”, lo cual da inicio a la misión cargada en el controlador de vuelo, cediendo el control del dron al piloto automático. El dron comienza el despegue hasta alcanzar una altura programada de 4.5 m, para después dirigirse a las coordenadas del segundo punto de control conservando la misma altura. En las gráficas (a) y (b) se puede ver como los valores de latitud y longitud empiezan a cambiar hasta llegar a la coordenada indicada en la misión. En la Figura 4.9 se puede observar la representación de la misión. Después de llegar al segundo punto de control el dron comienza el aterrizaje, cumpliendo la misión y dando paso a desactivar el modo de vuelo automático al detenerse los motores.

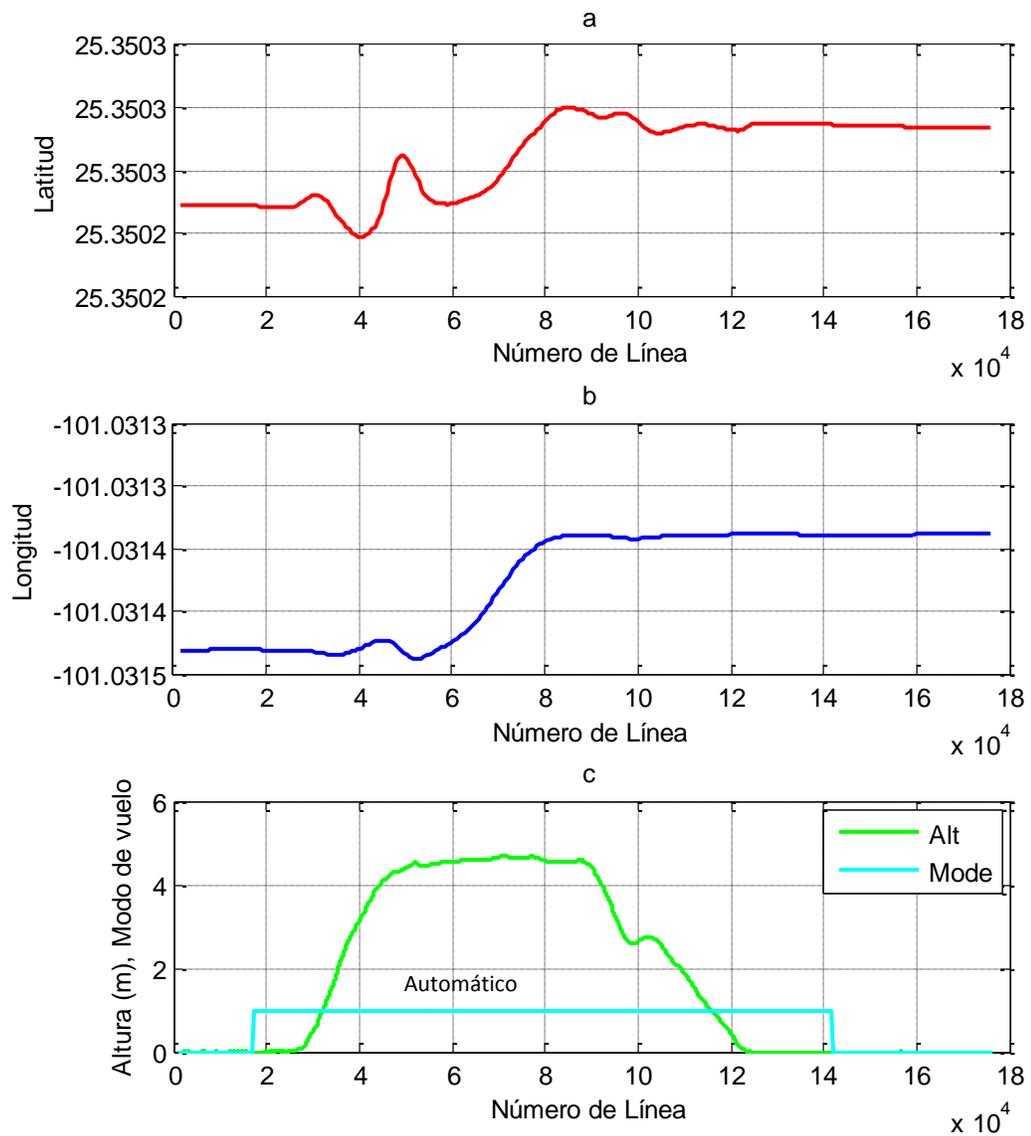


Figura 4.8 Gráfica de los datos del primer vuelo de prueba en modo automático con dos puntos de control.



Figura 4.9 Misión de dos puntos de control.

4.5 Prueba para realizar un vuelo automático con 9 puntos de control.

Después de poder realizar un vuelo automático como el descrito anteriormente, se realizaron más vuelos de prueba con incrementos graduales en el número de puntos de control, con el objetivo de ir verificando gradualmente el comportamiento del dron en misiones más complejas. En la Figura 4.10 se muestra las gráficas de los datos de un vuelo de prueba en el modo automático, con una misión de 9 puntos de control. Al observar la gráfica (c) de la Figura 4.10, se puede ver que el dron después de cambiar al modo automático empieza el ascenso, hasta alcanzar una altura programada de cuatro metros. Las gráficas (a) y (b) permiten ver que después de cumplir la altura predefinida, el dron comienza a desplazarse hacia a las coordenadas de los siguientes puntos de control programados en la misión, siguiendo la ruta mostrada en la Figura 4.11. Finalmente, se puede ver que tanto la latitud como la longitud vuelven a su valor inicial, esto debido a que el último punto de control indica el regreso a casa, es decir, regresar a donde el dron comenzó la misión. En la gráfica (c) se puede ver que, durante todo el trayecto a los diferentes puntos de control, el dron trata de conservar la misma altura. Esto debido a que así fue programada la misión, con el objetivo de verificar el funcionamiento del control de altura, al exigirle un

posicionamiento en diferentes coordenadas. Se puede apreciar que al inicio de la misión, al dirigirse al segundo punto de control, la altura presenta un descenso de más de 50 cm. Esto debido a que se presentó un error de pérdida de empuje en un motor, como se puede ver en la gráfica (c) de la Figura 4.10, se muestra el mensaje de Error: THRUST_LOSS_CHECK-1, justo en el momento cuando se produce el descenso de la altura. Este error indica que se perdió empuje en el motor número 1, por lo que el control trata de compensar con los demás motores produciendo un descenso no programado, para mantener la estabilidad. Para evitar que este error se volviera a presentar en pruebas posteriores, se decidió cambiar ese motor. También al final, en el regreso a casa la altura es de más de 4 m, posiblemente debido a que durante ese trayecto la dirección del viento estaba a favor de la dirección del dron. Lo que favoreció a la propulsión provocando un incremento de altura, pero se puede ver que el control trata de corregir ese error con respecto a la altura programada.

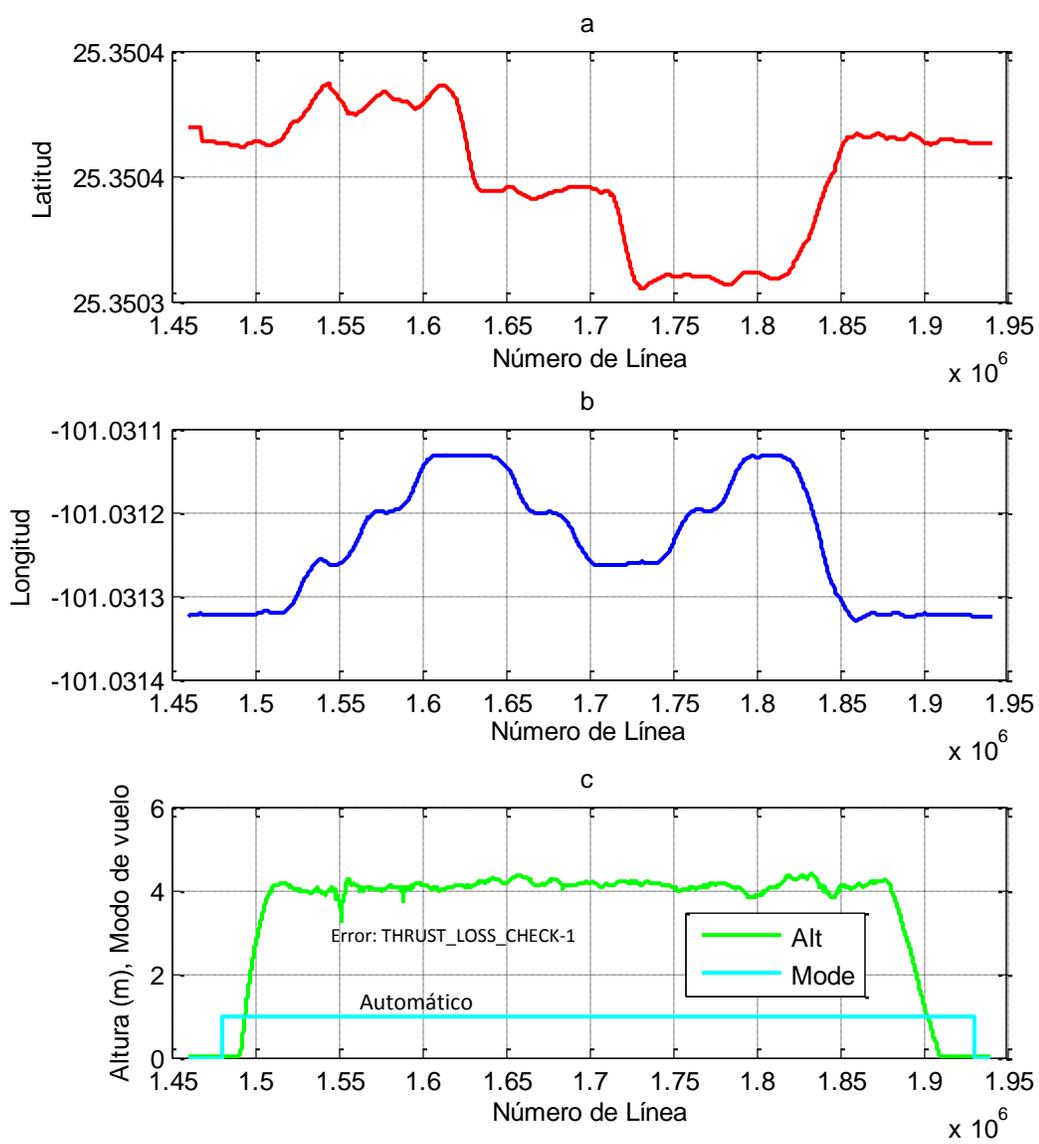


Figura 4.10 Gráficas de los datos del vuelo de prueba en modo automático con 9 puntos de control.

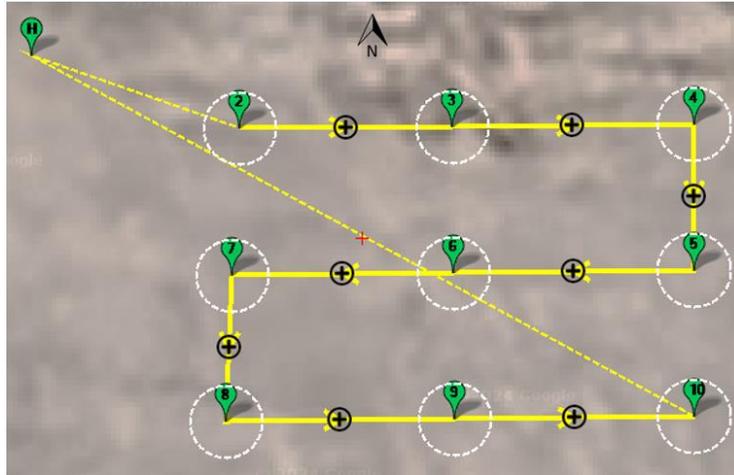


Figura 4.11 Visualización de la misión con 9 puntos de control, reteniendo la misma altura.

Cabe mencionar que hasta este punto aún no se incorporaba el rover del sistema de corrección RTK al dron, todas las pruebas descritas anteriormente se realizaron con el módulo GPS UBX M10050. Esto se decidió como medida de seguridad, para instalar el rover cuando ya se tuviera la certeza del comportamiento del dron en diversas situaciones de vuelo y así poder evitar posibles daños a los módulos del rover.

4.6 Prueba para comprobar el funcionamiento del sistema de corrección RTK.

Después de tener funcionando todo el sistema de corrección RTK, se procedió a realizar pruebas para verificar la precisión del sistema. Para realizar esta prueba, se dibujó en el piso unas letras representativas (UA) con la ayuda de un gis, con un tamaño de 3 m de ancho por 4 m de largo. Para posteriormente realizar pasadas con el rover por estas letras dibujadas. Para lo cual, la antena del rover fue acondicionada sobre una pequeña rueda y con una marca justo en el centro de la antena como se puede ver en la Figura 4.12, con la finalidad de poder realizar un seguimiento preciso de las letras. Se realizaron cuatro repeticiones de esta prueba con el objetivo de tomar una repetición como referencia y verificar la repetibilidad de las otras tres con respecto a la referencia. La Figura 4.13 muestra la gráfica de los datos obtenidos durante esta

prueba, en donde se obtuvo un error promedio de 3 cm en la segunda prueba, 2 cm en la tercera y 2 cm en la cuarta prueba, con respecto a la primera prueba. Obteniendo por lo tanto un error promedio general en el sistema de corrección RTK de 2.3 centímetros. Por lo cual, en esta prueba el sistema de corrección RTK tiene una precisión de 2.3 centímetros en el plano (X,Y). Sin embargo, el dato de altura que proporciona el sistema RTK está muy desfasado de la realidad, como se puede ver en la Figura 4.14. Por lo cual, este dato no fue tomado como referencia principal de (z), en la entrada del control de altura para el dron. Cabe mencionar que, durante esta prueba, el sistema perdió en varias ocasiones la corrección, causado posiblemente por la interferencia generada en el lugar donde se realizó la prueba. Además de que la antena se encontraba a menos de 10 cm del suelo, lo que favorece a la interferencia. Adicionalmente el error humano es otro factor que afectó la precisión durante esta prueba, debido a que el seguimiento de las letras fue realizado mediante la destreza manual, por lo que no se puede asegurar que las trayectorias de las repeticiones fueron exactamente iguales.



Figura 4.12 Acondicionamiento de la antena del rover para las pruebas de precisión.

Sin embargo, al estar realizando el levantamiento de las coordenadas de los puntos de control, para la misión descrita en el apartado 4.7, se observó que solamente variaba el último dígito. El sistema de corrección RTK aporta coordenadas con 7 cifras después del punto decimal, por lo que al variar únicamente el último dígito la precisión sería por debajo de los 2.3 cm. En la Figura 4.15 se puede observar los datos de latitud y longitud durante el tiempo que estuvo la antena en el levantamiento del primer punto de la misión. En esta Figura se puede ver que tanto la latitud como la longitud tienen pequeñas variaciones, estas variaciones representan cambios en el orden de 10^{-7} . También se puede apreciar que a pesar de esas variaciones la latitud y la longitud siempre tratan de mantenerse en un solo valor. Después de analizar estos datos se calculó que la precisión durante este lapso de tiempo se mantiene entre 0 cm – 1.5 cm. Este mismo comportamiento se repite durante el levantamiento de las coordenadas de los 8 puntos restantes para la misión, generando un error promedio de 0.93 cm durante esta prueba.

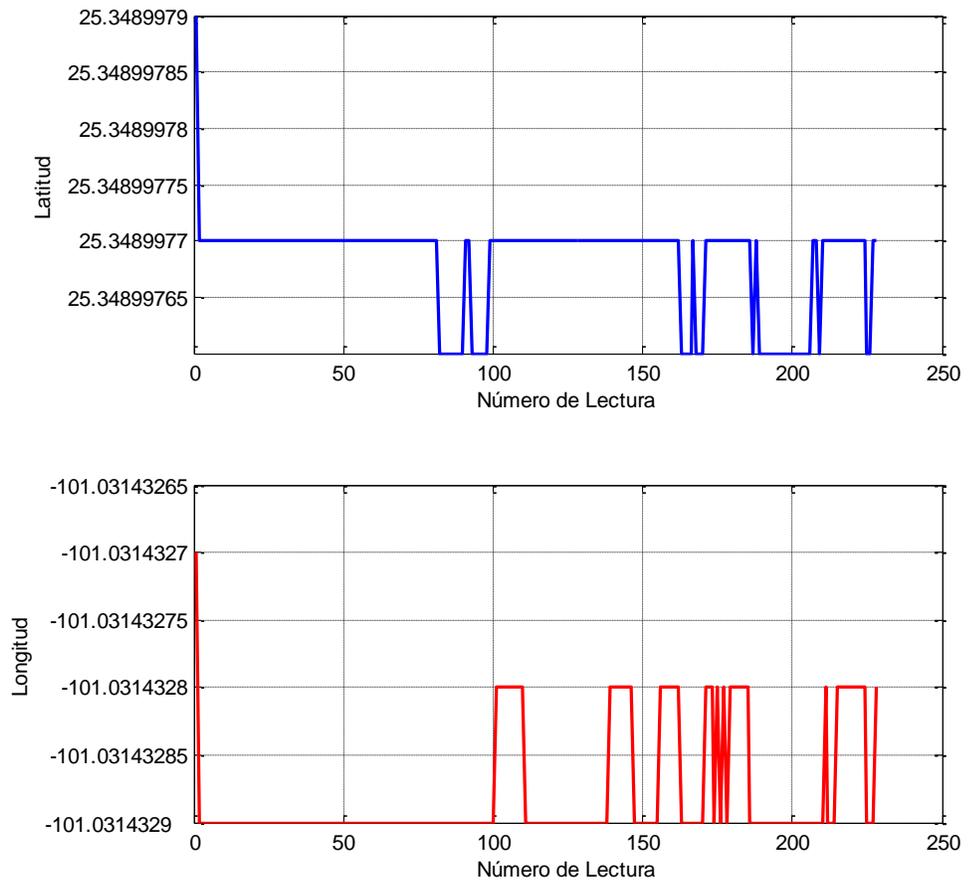


Figura 4.15 Graficas de los datos de latitud y longitud, al estar recogiendo los datos del primer punto para la misión descrita en el apartado 4.7.

4.7 Prueba final de un vuelo automático del dron con 9 puntos de control en los que tiene que realizar acciones específicas.

Finalmente se realizó una misión en la que el dron tenía que realizar la tarea específica de: aterrizar sobre determinado punto de control, esperar un tiempo establecido y volver a despegar para continuar con la misión ilustrada en la Figura 4.17. Esta misión se realizó con el objetivo de poder medir la precisión del aterrizaje con la corrección RTK. Para lo cual se marcaron previamente los puntos de aterrizaje en la zona específica donde se realizaría la misión y se tomó la coordenada con el RTK activo de cada punto marcado, para posteriormente ingresar las coordenadas a cada punto de control de la misión respectivamente. En la Figura 4.16 se muestran las gráficas de los datos obtenidos durante esta prueba de vuelo. Para la gráfica (c) la referencia de los valores de Mode con respecto a los modos de vuelo, se describen en el cuadro 4.2. Tomando en cuenta esta referencia, se puede ver que el dron se encuentra en el modo “estabilizado”, después se realiza el cambio al modo “automático” para comenzar con la misión. Al dar inicio la misión, el dron despegó y alcanza una altura programada de tres metros, para después dirigirse al primer punto de control, en donde dará inicio a realizar la tarea específica programada. Por lo tanto, el dron aterriza y espera ahí el tiempo indicado, que en este caso se le programó que fuera de un segundo. Después, el dron despegó nuevamente para continuar con la misión. Como se puede ver en la gráfica (c), el proceso anterior se repite nueve veces siguiendo la ruta mostrada en la Figura 4.17. Finalmente, el último despegue y aterrizaje de esta gráfica representa el regreso a casa, aterrizando en el punto donde inició la misión. En las gráficas (a) y (b) se puede ver que el dron realmente regresó a las coordenadas en donde inició la misión, finalizando con éxito la misión. Adicionalmente en la Figura 4.18 se pueden observar una representación 3D de la posición (X,Y,Z) del dron, durante la realización de esta misión. Es posible apreciar la trayectoria que siguió el dron, en donde la variación en la paleta colores representan el tiempo de la misión, cuyo valor es de 304 segundos recorriendo una distancia total de 106.4 m a una velocidad promedio de 0.35 m/s. También se pueden apreciar la

variación de la altura de un punto de control a otro y las trayectorias reales de ascenso y descenso. De igual manera se puede apreciar el área cubierta durante la misión y la distancia entre un punto y otro; algo que no se ve directamente en las demás gráficas. Adicionalmente se puede apreciar muy bien que regresa al punto de inicio de la misión (RTL), con una muy buena precisión.

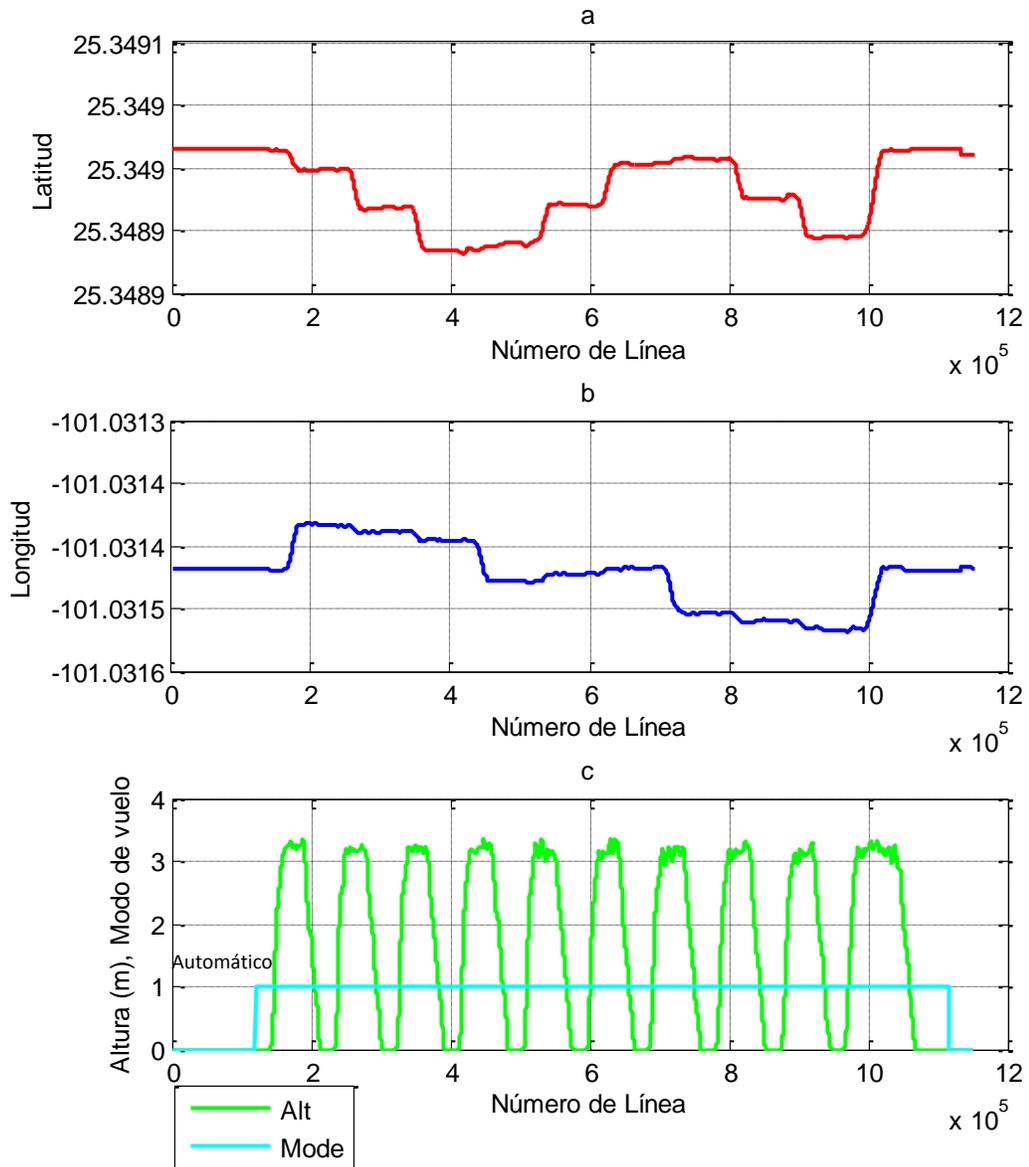


Figura 4.16 Datos del vuelo de prueba en modo automático aterrizando en nueve puntos específicos determinados como muestra para evaluar la precisión del dron en los aterrizajes.

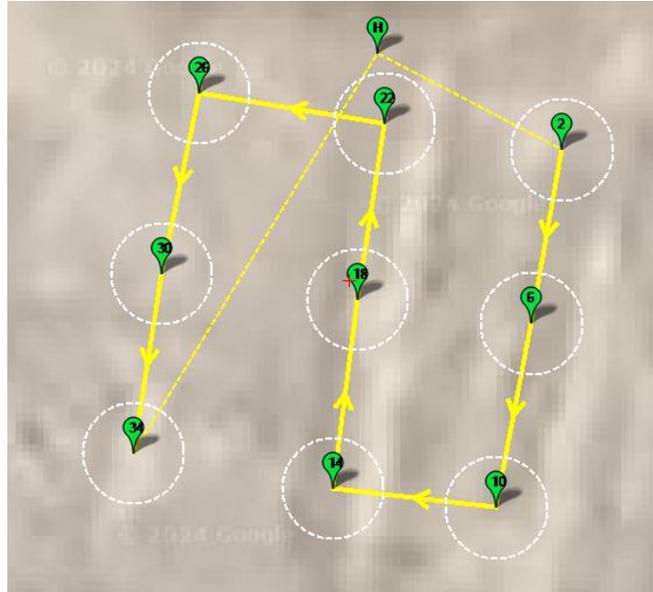


Figura 4.17 Misión aterrizando en nueve puntos específicos determinados como muestra para evaluar la precisión del dron en los aterrizajes.

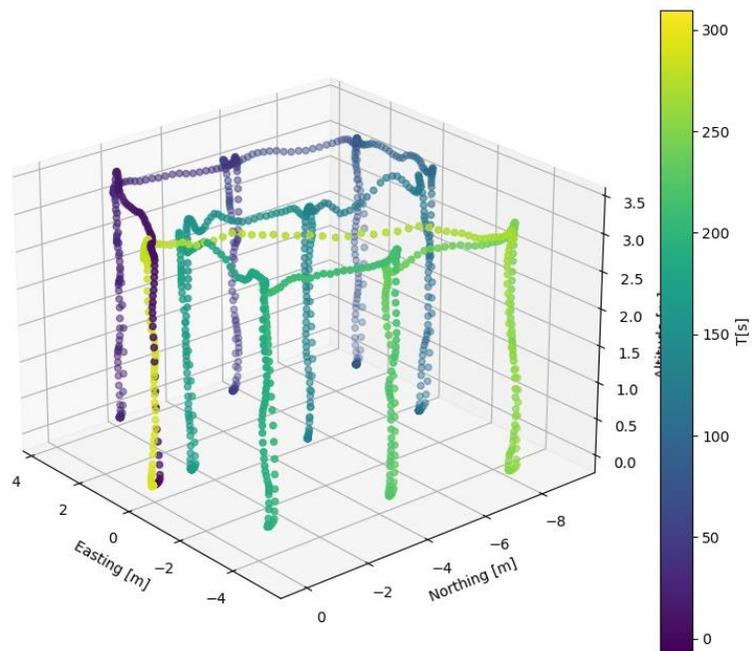


Figura 4.18 Representación 3D de los datos de la misión aterrizando en nueve puntos específicos determinados como muestra, para evaluar la precisión del dron en los aterrizajes.

4.8 Evaluación de la precisión del dron en los aterrizajes con la corrección RTK.

Teniendo los datos de los registros de vuelo de la misión descrita en el apartado 4.7, se realizó el análisis para determinar con que precisión el dron aterrizó en cada punto indicado. La Figura 4.19, muestra los resultados de la evaluación de la precisión con la que el dron aterrizó en los nueve puntos planteados como muestra para evaluar dicha precisión. El color azul (Home) representa el lugar donde inicio la misión, el color rojo (Teórico) es el punto marcado antes de realizar el vuelo y el color verde (Práctico) representa el aterrizaje del dron en ese punto correspondiente. Se puede ver que el sistema RTK del dron logró una precisión máxima de 2 cm y una precisión mínima de 16 cm, obteniendo en general un promedio de 8 cm durante los aterrizajes. Como ya se revisó anteriormente, la precisión del sistema de corrección RTK sin integrar el rover al dron, alcanzó un valor de 2.3 cm con las interferencias descritas. Sin embargo, al incorporar el rover al dron se expone a nuevos factores de movimiento que no dependen del sistema RTK, si no del sistema de control del dron, afectando así la precisión de la posición del dron. Además, durante la realización de esta prueba las condiciones del viento, lo nublado del día y el no considerar el colchón de aire generado por las hélices, fueron factores que afectaron la precisión de los aterrizajes. No obstante, es posible aumentar la precisión de los aterrizajes, para lo cual es necesario realizar una calibración de ganancias mucho más fina, considerando los factores mencionados anteriormente. Por motivos de tiempo y considerando tener futuras investigaciones sobre este proyecto, se consideraron como aceptables estos resultados para esta etapa del proyecto.

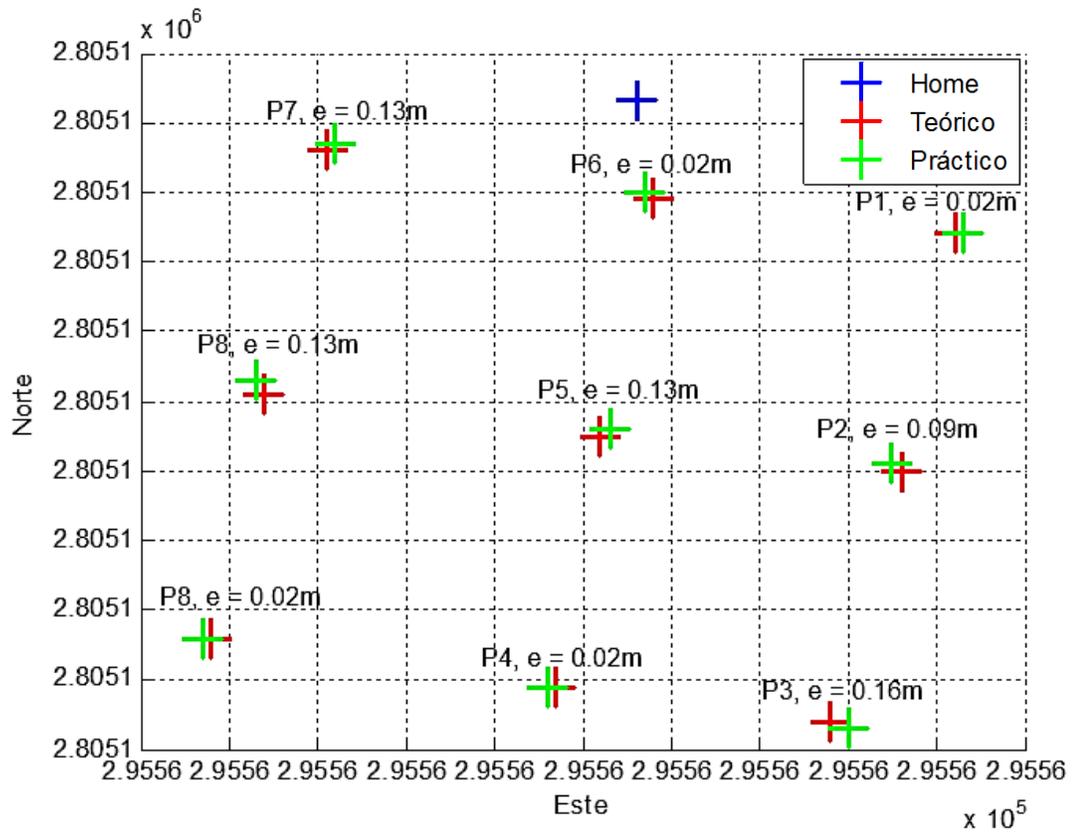


Figura 4.19 Precisión del dron en los aterrizajes, indicada por el sistema de corrección RTK.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En los últimos años, se ha apreciado cada vez más el uso de los drones en la agricultura, debido a los evidentes beneficios en la gestión de los cultivos. Sin embargo, el elevado costo de adquisición y la mano de obra calificada para operarlo, son el principal obstáculo para los productores. En este trabajo se demostró que es posible construir un dron de código abierto, automático y con precisión menor a 10 cm, dedicado a las tareas de recolección de datos de los terrenos agrícolas. Para la construcción del dron se utilizó plataformas hardware de arquitectura abierta y software de código abierto. Asegurando menor costo de adquisición a los productores, así como una versatilidad de uso en diversas actividades.

Para lograr la precisión menor a 10 cm en el plano, se construyó un sistema de corrección RTK el cual consta de una estación base y una estación móvil (rover). La prueba realizada para evaluar la precisión del propio sistema indica que estando en movimiento el rover, el sistema tiene una precisión de 2.3 cm. Sin embargo, durante la realización de esta prueba se perdió la corrección en varias ocasiones, debido a los edificios aledaños al lugar de la prueba, implementos metálicos de los tractores y adicionalmente el error humano. No obstante, se observó que, en un lugar libre de obstáculos como edificios y árboles, y estando la antena del rover estática, la precisión fue de menos de 1 cm.

Una vez integrado el sistema de corrección RTK en el dron, se evaluó la precisión de los aterrizajes realizados de manera autónoma, mediante una muestra de nueve aterrizajes durante una misión, obteniendo una precisión promedio de 8 cm. El

hecho de que el sistema de corrección RTK esté integrado en el dron, no significa que el dron tendrá la misma precisión que cuando el sistema de corrección está solo y en reposo. Debido a que la precisión en el plano (X,Y) del dron durante el vuelo y el aterrizaje, no dependen únicamente del sistema de corrección RTK, ya que le afectan factores externos que perjudican el control del dron, como el viento, el colchón de aire generado en los aterrizajes y las propias ganancias PID del control. Por motivo de tiempo y considerando tener futuras investigaciones al respecto, se consideraron como aceptables los resultados presentados en esta etapa del proyecto. Sin embargo, es posible mejorar la precisión de los aterrizajes del dron en futuras investigaciones, realizando una calibración más fina de las ganancias PID de roll, pitch y yaw, además considerando factores como el viento y el colchón de aire generado por el movimiento de las hélices.

El dron actualmente puede realizar misiones automáticas, que pueden ser de gran utilidad en trabajos para la agricultura de precisión. Una misión similar a la descrita en el apartado 4.5 puede ser utilizada para tomar fotografías sobre determinados puntos de los cultivos y generar con esto un mapeo con resolución física de pocos metros. En el apartado 4.7 se describe una misión en la que el dron realiza tareas específicas en determinados puntos de control; esta misión, puede ser modificada para realizar tareas más complejas en cada aterrizaje. Durante esta misión representativamente solo se programó un tiempo de espera una vez que realizaba un aterrizaje, pero esta indicación puede ser cambiada por algo más complejo, como por ejemplo medir una variable agrícola directamente del suelo. Claro que para realizar esto se tendría que instrumentar adecuadamente al dron. Lo cual según el marco teórico existen muy pocos indicios de investigaciones al respecto, generando con ello una posible línea de investigación.

Pero la funcionalidad del dron no solo se limita a las misiones ya realizadas, si no que se pueden generar misiones de acuerdo a necesidades específicas. Además, al ser totalmente de código abierto se le puede añadir diferente instrumentación, para poder

realizar tareas específicas de apoyo en la gestión de los cultivos. Por ejemplo, se puede añadir una cámara multiespectral y al ser un dron automático puede ser operado de noche pues no es necesario tenerlo a la vista, esto ayudaría a reducir la interferencia de la luz solar que causa reflejos y deslumbramientos en las imágenes capturadas. También se puede instrumentar esta plataforma para poder realizar dosificaciones por aspersión con dosificación variable. Además, la incorporación de inteligencia artificial puede ser utilizada junto con una cámara, para diferentes aplicaciones, como por ejemplo la contabilización de las plantas en el terreno, identificación de deformidades en la planta, monitorear el tamaño de la planta, entre otras. Así mismo con las adecuadas bases de datos, se puede entrenar una red neuronal para poder realizar detección de enfermedades en las plantas, en una etapa temprana de la enfermedad. De igual manera se puede utilizar el internet de las cosas, para realizar la recolección de datos con el dron y al mismo tiempo estar subiendo los datos a la nube, para ser procesados en algún servidor y así generar mapas de interés en tiempo real.

El autor espera que en futuras investigaciones el resultado de esta investigación sirva como plataforma para poder implementar una instrumentación al dron, dedicándolo a las tareas de recolección de datos de los terrenos agrícolas. Contribuyendo con esto a mejorar la gestión de los cultivos agrícolas de una manera más económica, eficiente, sostenible y productiva.

REFERENCIAS

- Ahirwar S., R. Swarnkar, S. Bhukya, G. Namwade. 2019. Application of drone in agricultura. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. Volumen (8). Pp 2500-2505.
- Amazon. 2023. Los más vendidos en drones. Los más vendidos. Amazon. <https://www.amazon.com.mx/gp/bestsellers/toys/12005828011> . (26, septiembre, 2023).
- ArduPilot Dev Team. 2023. Continuing a Mission After Landing. Mission Planning. ArduPilot. <https://ardupilot.org/planner/docs/common-continue-mission.html> . (07, noviembre, 2023).
- ArduPilot. 2023. BeagleBone Blue. ArduPilot Wiki. <https://ardupilot.org/copter/docs/common-beagle-bone-blue.html> . (14, febrero, 2023)
- ASGROW. 2020. ¿QUÉ ES LA AGRICULTURA 4.0? Tendencias ASGROW. <https://www.asgrow.com.mx/es-mx/tendencias/gestionagricola/-que-es-la-agricultura-4-0-.html> . (22, septiembre, 2023).
- BASF. 2022. ¿Qué es la Agricultura 4.0? Agricultura 4.0. https://agriculture.basf.com/mx/es/contenidos-de-agricultura/digitalizacion-agricultura-4-0.html#accordion_v2-c30304a1fd-item-6069f33ab9 . (22, septiembre, 2023).
- Beagleboard.org. 2023. What is BeagleBone Blue? Beagleboard.org. <https://www.beagleboard.org/boards/beaglebone-blue> . (20, octubre, 2023).
- Bernat Marcos. 2023. El dron de la NASA Ingenuity. Infodrones. <https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/4316124/dron-nasa-ingenuity-resucita-marte-seis-dias-dar-senales> . (01, noviembre, 2023).

- Casos exitosos. 2022. DJI: la clave detrás del crecimiento del gigante en drones. CASOS EXITOS. <https://www.casosexitosos.com/innovacion/claves-dji/> . (25, septiembre, 2023).
- Castillo Octavio. 2023. El mejor robot aspirador que hemos probado. Techradar. <https://global.techradar.com/es-mx/home/robot-vacuums/el-mejor-robot-aspirador-que-hemos-probado-baja-a-un-precio-record-antes-del-black-friday>. (02, noviembre, 2023).
- Colby Smith, Chantel Lapins, Issak Allaire-MacDonald, Rudy Gapinski, Blake Roling, Ryan Dalby. 2021. Autonomous Drone for Air, Water, and Soil Sampling. Department of Mechanical Engineering. The University of Utah. <https://www.mech.utah.edu/wp-content/uploads/2021/04/Team-1-S21s.pdf>
- Cuerno Rejado Cristina, Luis García Hernández, Alejandro Sánchez Carmona, Adrián Carrillo, José Luis Sánchez López, Pascual Campoy. 2016. Evolución histórica de los vehículos no tripulados hasta la actualidad. Universidad Politecnica de Madrid. Vol. 91. No. 3. p 332.
- Emad Ebeid, Martin Skriver, Jie Jin. 2017. A survey on open-soucer flight control platforms of unmanned aerial vehicle. Euromicro Conference on Digital System Design. Volumen 2. No. 17. Pp. 396-402.
- Emad Ebeid, Martin Skriver, Kristian Husum, Kjeld Jensen, Ulrik Pagh. 2018. A survey of open-source UAV flight controllers and flight simulators. Microprocessors and Microsystems. DOI: 10.1016/j.micro.2018.05.002. Pp. 1-5.
- Fingas Roger. 2015. Amazon teases new details of planned Primer Air drone delivery service. AI. <http://appleinsider.com/articles/15/11/30/amazon-teases-new-details-ofplanned-prime-air-drone-delivery-service>). (14, septiembre, 2023).
- Food and Agriculture Organization. 2018. México rural del Siglo XXI. Ciudad de México. <http://www.fao.org/3/i9548es/I9548ES.pdf> . (23, septiembre, 2023).

- Ganesano S., A. Muthukumar, C. Sanjay, A. Saran, S. Surya Raja. 2023. International Conference on Circuit Power and Computing Technologies. 10.1109/ICCPCT58313.2023.10245325.
- Go dron. 2023. DJI Mavic 3M. Tienda Go drone. <https://tienda.godron.mx/dji/dji-mavic-3m/> . (27 septiembre, 2023).
- Gonzales Adrián, Gelberth Amarillo, Milton Amarillo, Francisco Sarmiento. 2016. Drones aplicados a la agricultura de precisión. Revista especializada en ingeniería. Vol. 10. P. 12.
- Güisso Mauro, José Aldabalde, Ian Herrera. 2019 Sistema de posicionamiento satelital con exactitud de centímetros para soluciones en agricultura de precisión. Entregado como requisito para la obtención del título de Ingeniero en Electrónica. Universidad ORT Uruguay Facultad de Ingeniería. Pp. 33-35.
- Hamil H., MS. Azzaz, S. Sakhil, A. Maali, Z. Zidelmal, D. Abdeslam. 2019. Diseño e implementación FPGA en tiempo real de modulación PWM y PPM para aplicaciones de banda ancha. Conferencia internacional sobre imagen y seña procesamiento y sus aplicaciones (ISPA). Mostaganem, Argelia. Sexta edición. Pp. 1-5.
- Heutger M. 2014. Unmanned Aerial Vehicle in Logistics: A DHL Perspective on Implications and use Cases for the Logistics Industry. DHL Customer Solutions & Innovation. Troisdorf Germany.
- Hideyuki Tanaka, Yoshio Matsumoto. 2019. Autonomous Drone Guidance and Landing System Using AR/high-accuracy Hybrid Markers. Global Conference on Consumer Electronics. 10.1109/GCCE46687.2019.9015373. Pp. 598-599.
- HobbyKing. 2023. Turnigy MultiStar 32bit 30A Race Spec ESC 2~4S (OPTO). HobbyKing.com. https://hobbyking.com/en_us/multistar-32bit-30a-0-lite.html?store=en_us . (21, octubre, 2023).
- Howarth Dan. 2015. NASA plans to use drones for exploring Mars. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2015/01/28/nasa-helicopter-drones-explore-mars-jet-propulsion-laboratory/> .(17, septiembre, 2023).

- Ibañez. 2017. ¿Qué es un LIDAR, y cómo funciona el sensor? Motorpasion. <https://www.motorpasion.com/tecnologia/que-es-un-lidar-y-como-funciona-el-sistema-de-medicion-y-deteccion-de-objetos-mediante-laser> . (03, octubre, 2023).
- Inceptive Mind. 2022. Atlis, un dron híbrido concebido para el transporte de cargas pesadas y de largo alcance. World energy trade. <https://www.worldenergytrade.com/innovacion/robotica/atlis-un-dron-hibrido-concebido-para-el-transporte-de-cargas-pesadas-y-de-largo-alcance> .(15, septiembre, 2023).
- James Rennie. 2016. Drone types: multi-rotor vs fixed-wing vs single rotor vs hybrid vtol. AUAV. <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/> . (14, septiembre, 2023).
- Jin W., H.L. Ge, H.Q. Du, X.J. Xu.2009. A review on unmanned aerial vehicle remote sensing and its application. Remote Sens. Inf. 1. Pp 88–92.
- Jubair Md Abu, Sajid Hossain, Md Abdullah Al Masud, Kazi Mahmud Hasan, SH Shah Newaz, Md Shamim Ahsan. 2018. Design and development of an autonomous agricultural drone for sowing seeds. Brunei International Conference on Engineering and Technology. 10.1049/cp.2018.1598
- Kazi Mahmud Hasan, Dr. Tariq Hasan, SH Shah Newaz, Abdullah Al Naid, Dr. Shamim Ahsa. 2020. Design and Development of an Autonomous Pesticides Spraying Agricultural Drone. 2020 IEEE Region 10 Symposium. Pp. 811-814.
- Kentfaiht. 2023. ¿Qué Es Una Tarjeta De Memoria Micro Sd? K&F Concept España. https://www.kentfaith.es/blog/article_que-es-una-tarjeta-de-memoria-micro-sd_93 . (24, octubre, 2023).
- Koh L., S. Wich. 2012. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for Conservation. Trop. Conserv. Sci. 5 (2). Pp 121–132.
- Kuan Ting Lai, Yueh Tsung Chung, Jun Jia Su, Chien Hung Lai, Yu Hsuan Huang. 2023. An AIoT Drone System for Commanding ArduPilot UAVs. IEEE Systems Journal. Volumen 17. No. 2. Pp. 2213-2224.

- López Pablo. 2023. ¿Qué es una ISO y para qué sirve? GEEKNETIC. <https://www.geeknetic.es/ISO/que-es-y-para-que-sirve> . (23, octubre, 2023).
- López Vicente Édison Javier, Vayas Moposita Patricio Santiago. 2020. Diseño y construcción de un dron rociador de fertilizantes y pesticidas con capacidad útil de carga de 5 kg y autonomía de vuelo mínima de 8 minutos. Trabajo de titulación. Ingeniero mecanico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. P 24.
- Martin Arias Elena. 2019. Integración de sistema Real Time Kinematic con unidad de medición inercial dentro del software Aerostack. Trabajo de fin de grado. Grado en ingeniería en tecnologías industriales. Universidad Politecnica de Madrid. Pp. 18-20.
- Martinez Andres, Luis Mosquera, Sergey Jatsun, Oksana Emelyanova. 2022. UAV Soil Sampling in Andean Highlands for Precision Agriculture. Agriculture Digitalization and Organic Production. (pp.375-387) https://www.researchgate.net/profile/Andres-MartinezLeon/publication/365473744_UAV_Soil_Sampling_in_Andean_Highlands_for_Precision_Agriculture/links/63dec92ec97bd76a82689b1d/UAV-Soil-Sampling-in-Andean-Highlands-for-Precision-Agriculture.pdf?origin=scie
- MathWorks. 2019. ¿Qué es un LIDAR? MathWorks Discovery. <https://la.mathworks.com/discovery/lidar.html> . (03, octubre, 2023).
- Matlog. 2023. Accueil Modules, XBee 868 MHz et 915 MHz, XBee Pro 868 SX. Matlog.fr. <https://www.matlog.fr/collections/xbee-868-915-mhz/products/modules-xbee-sx-868-point-a-point-et-digimesh> . (21, octubre, 2023).
- Mercado Libre. 2023. Kit frame drone s500 azul/preto 500mm pcb 4 eixo qudrcopter. Mercado Libre. <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1039376198-kit-frame-drone-s500-azulpreto-500mm-pcb-4-eixo-qudrcopter- JM> . (20, octubre, 2023).
- Mercado libre. 2023. Los drones más vendidos. Mercado libre. <https://listado.mercadolivre.com.mx/los-drones-mas-vendidos> . (26, septiembre, 2023).
- Mercado Libre. 2023. Protectores De Helices Dji Phantom 3. Mercado Libre. <https://articulo.mercadolivre.com.mx/MLM-2235544072-protectores-de-helices-dji->

[phantom-3- JM#position=18&search_layout=grid&type=item&tracking_id=87fb0afd-8557-4f62-94f7-c262ba396d41](#) . (22, octubre, 2023).

Mercado Libre. 2023. Radio Control Remoto 2.4ghz Turnigy 9x. Mercado Libre. https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1470087292-radio-control-remoto-24ghz-turnigy-9x-y-receptor-i-a8-afhds- JM#position=13&search_layout=grid&type=item&tracking_id=0d0941e0-ef13-4a07-8586-cb11afa571c7 . (22, octubre, 2023).

Mercado Libre. 2023. Receptor I A8 Afhds. Mercado Libre. https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1470087292-radio-control-remoto-24ghz-turnigy-9x-y-receptor-i-a8-afhds- JM#position=13&search_layout=grid&type=item&tracking_id=0d0941e0-ef13-4a07-8586-cb11afa571c7 . (22, octubre, 2023).

Miraj Uddin, Md. Reyad Hossain, Md. Shahriar Rabbi, Md. Akib Hasan, Md. Saniat Rahman Zishan. 2019. Unmanned Aerial Vehicle for Cleaning the High Rise Buildings. International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques. 10.1109/ICREST.2019.8644476.

Mondor Intelligence. 2023. Análisis del tamaño y la participación del mercado de los drones tendencia y pronósticos de crecimiento (2023-2028). MondorIntelligence. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/drones-market> . (25, septiembre, 2023).

Morales Francisco Roco. 2001. Caracterización de un sistema motriz con un motor brushless para un avión no tripulado. Trabajo de titulación. Universidad de Concepcion. Santiago de Chile. Pp. 22-47.

Morcon P., J. Janousek, R. Kadlec. 2018. Vision-Based and Differential Global Positioning System to Ensure Precise Autonomous Landing of UAVs. 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium. Pp. 542-546.

Nanxi Li, Chong Pei Ho, Jin Xue, Leh Woon Lim, Guanyu Chen, Yuan Hsuingfu, Lennon Yao Ting Lee. 2022. A progress review on solid-state LIDAR and Nanophotonics-base LIDAR sensors. Laser and photonics reviews. Volumen 16. No. 11. Pp. 2-5.

- Naylamp Mechatronics. 2023. MÓDULO MAGNETÓMETRO 3-EJES HMC5883L. Naylamp Mechatronics. <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/89-modulo-magnetometro-3-ejes-hmc5883l.html> . (22, octubre, 2023).
- Ochoa M. 2016. Aplicación de los drones en la mHEALTH: una realidad sin normativa legal. Tesis de grado. Universidad San Pablo.
- Piriyasupakij Jiranuwat, Ratchada Prasitphan. 2023. Design and Development of Atonomous Drone to Detect and Alert Intruders in Surveillance Areas. International Conference on Business and Industrial Research. Pp. 673-677.
- Raiyan Al Jaber, Dr. Shoaib Sikder, Rowsson Ara Hossain, Kh. Fatema Nur Malia, Dr. Abdur Rahman. 2021. Unmanned Aerial Vehicle for Cleaning and Firefighting Purposes.
- Ramírez Germán, Andrés Montes de Oca, Gerardo Flores. 2023. 3D maps of vegetation índices generated onboard a precisión agricultura UAV. 2023 International Conference on Amanned Aircraft Systems. 10.1109/ICUAS57906.2023.10156582. Pp. 564-571.
- RC Groups. 2023. Multistar 2212 - 920KV Multi-Rotor Motor Set. RC Groups.com. <https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2221588-Multistar-2212-920KV-Multi-Rotor-Motor-Set> . (21, octubre, 2023).
- Restas A. 2015. Drone applications for supporting disaster management, World J. Eng. Technol. 3 (03) .P 316.
- Ríos Hernández Rodolfo. 2021. Use of drones or unmanned aerial vehicles in precisión agricultura. Revista ingeniería agrícola. Volumen 11 No. 4. Pp 75-84.
- Schwab K. 2015. The fourth industrial revolution. Whats it Means and How to Respond. http://www.inovasyon.org/pdf/WorldEconomicForum_The.Fourth.In . (24, septiembre, 2023).
- SparkFun Electronics. 2023. SparkFun GPS-RTK2 Board - ZED-F9P (Qwiic). SparkFun start something. <https://www.sparkfun.com/products/15136> . (21, octubre, 2023).
- SparkFun Electronics. 2023. TFMini-S - Micro LiDAR Module. SparkFun start something. <https://www.sparkfun.com/products/16977> . (21, octubre, 2023).

- Springer Josue, Marcel Kyas. 2022. Autonomous Drone Landing with Fiducial Markers and a Gimbal-Mounted Camera for Active Tracking. International Conference on Robotic Computing. 10.1109/IRC55401.2022.00047. Pp. 243-247.
- Starware. 2023. Modulo desarrollo ttgo esp32 display 1.14p usb tipo c wifi 4MB. Starware. <https://tienda.starware.com.ar/producto/modulo-desarrollo-ttgo-esp32-display-114p-usb-tipo-c-wifi-4mb/> . (23, octubre, 2023).
- Taoglas. 2023. AA.171 – Antena MagmaX IP67 GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou Parche de doble pin, 3M RG-174. TAOGLAS. <https://www.taoglas.com/product/magmax-aa-171-gpsglonassbeidou-antenna-2/> . (22, octubre, 2023).
- Teran Haughey Miguel. 2023. Los drones de reparto ya son una realidad en Estados Unidos. El Economista.es. <https://www.economista.es/tecnologia/noticias/12095401/01/23/Los-drones-de-reparto-de-Amazon-ya-son-una-realidad-en-Estados-Unidos-.html> . (07, noviembre, 2023).
- The MathWorks. 2023. ¿Qué es Matlab? MathWorks. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html> . (24, octubre, 2023). Zaid Tahir, Waleed Tahir, Saad Ali Liaqat. 2016. State Apace System Modeling of a Quad Copter UAV. Indian Journal of Science and Technology. 9(27).
- THIDO electrónica. 2021. Descripción del arduino mini pro. Electrónica THIDO. <https://electronicathido.com/detallesProducto.php?id=c3V1NEN5WXhZWVltSWNzSm16RTRLZz09#:~:text=El%20Arduino%20Mini%20pro%20es,montaje%20de%20tiras%20de%20pines>. (23, octubre, 2023).
- Tomoji Takasu, Akio Yasuda. 2009. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. Simposio internacional sobre GPS/GNSS 2009. Pp. 1-6.
- Unicrom. 2023. LED – Diodo emisor de luz. Electrónica Unicrom. <https://unicrom.com/diodo-led/> . (23, octubre, 2023).

- Vicent Barrera Gaspar. 2018. Diseño y construcción de un UAS mediante Raspberry Pi y código abierto. Trabajo final para obtención de grado. Ingeniería Aeroespacial. Universidad Politecnica de Valencia. P. 84.
- Vidal V. F., L. M. Honorio, M. F. Santos, M. F. Silva, A.S. Cerqueira. E.J. Oliveira. 2017. UAV Vision Aided Positioning System for Location and Landing. International Carpathian Control Conference. Pp. 228-233.
- Wales Max. 2023. Types of drones: explore different types of drones. Filmora. <https://filmora.wondershare.com/drones/types-of-drones.html> . (15, septiembre, 2023).
- Watts A.C., V.G. Ambrosia, E.A. Hinkley. 2012. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. Remote Sens. 4 (6). Pp 1671–1692.
- Yilun Wu, Xintong Du, Rikky Duivenvoorden, Jonathan Kelly. 2019. The Phoe Drone: An Open-Source Dual-Rotor Tail-Sitter Platform for Research and Education. International Conference on Robotics and Automation. IEEE. Pp. 5330-5336.