



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE VUELO COOPERATIVO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA TAREAS DE MICROFUMIGACIÓN”

Trabajo de Titulación

Tipo: DISPOSITIVO TECNOLÓGICO

Presentado para optar por el Grado Académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

AUTORES: SUQUI CONGACHA SILVANA NATALY

PAREDES CARRILLO JORGE LUIS

TUTOR: ING. FAUSTO RAMIRO CABRERA AGUAYO

Riobamba – Ecuador

2019

©2019, Silvana Nataly Suqui Congacha y Jorge Luis Paredes Carrillo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

El Tribunal de Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de investigación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE VUELO COOPERATIVO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA TAREAS DE MICROFUMIGACIÓN”, de responsabilidad de la señorita Silvana Nataly Suqui Congacha y el señor Jorge Luis Paredes Carrillo, ha sido minuciosamente por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Washington Luna DECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA	_____	_____
Ing. Freddy Chávez DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES	_____	_____
Ing. Fausto Cabrera DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	_____
Ing. Fabricio Santacruz MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	_____

Nosotros, **SILVANA NATALY SUQUI CONGACHA** y **JORGE LUIS PAREDES CARRILLO**, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual de la misma pertenece a la **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**.

Riobamba, abril de 2019

Silvana Nataly Suqui Congacha

Jorge Luis Paredes Carrillo

DEDICATORIA

A la forjadora de mi camino, mi Madre María Rosario Suqui, quien me ha brindado todo su apoyo paciencia y amor incondicional. Gracias, por haberme guiado, corregido, apoyado y motivado a ser un beneficio para la sociedad siendo una gran profesional, por lo demás ella ha sido el pilar fundamental y primordial en mi familia. A mi hermana Soledad, por sus consejos y por estar en los momentos más difíciles de la carrera ella, es un ejemplo de superación para toda la familia. A mi abuelita Graciela por todo su apoyo y preocupación sobre mi bienestar personal y estudiantil para seguir en el camino del conocimiento.

SILVANA

A mi padre Jorge, por no enseñarme a jugar fútbol, pero si el gusto por los videojuegos y la tecnología; a mi madre Germania por todo su amor y comprensión en aquellas noches de desvelo; en memoria de mi abuelo Jorge, a mis abuelos Carmen y César por todo su apoyo y sobre todo a mi abuela Amanda la cual ha marcado mi existencia significativamente con su afecto y cariño incondicional; a mis hermanos Freddy y Sofía por servirme de inspiración; a mi tío Edwin por ser un segundo padre en mi vida y a Valeria por hacerme volar, soñar y siempre estar conmigo en buenos y malos momentos a lo largo de toda mi vida universitaria cosechando los frutos de la perseverancia y el sacrificio.

JORGE

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, al Niño Jesús y a la Virgencita de Guadalupe por haberme dotado de salud, de una familia unida e incondicional, por haberme dado esta oportunidad de estudio y superación. Agradezco a toda mi familia Brito, por estar presentes en los momentos buenos y malos que nos pone la vida gracias por el apoyo absoluto y preocupación sobre mis estudios. A Cristian C. por ser una persona muy especial en mi vida y por estar siempre a mi lado en los altos y bajos, de mi vida universitaria. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por haberme abierto sus puertas al conocimiento, y en especial a mi tutor el Ing. Fausto Cabrera por su confianza en nuestros conocimientos y apoyo en la realización de esta tesis.

SILVANA

Quiero agradecer a Dios, a la Virgen Inmaculada y al Santo Hermano Miguel, porque me han dado salud y la oportunidad de estudiar y superarme, a toda mi familia por estar presentes en los momentos decisivos en mi vida, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y en especial a mi tutor el Ing. Fausto Cabrera por sus acertadas guías y recomendaciones. Al Ing. Carlos Romero por afianzar mis conocimientos durante mi periodo de pasantías y demostrarme como ser un profesional de excelencia.

JORGE

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XIV
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XV
RESUMEN.....	XVI
SUMMARY.....	XVII
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 Orígenes de los vehículos aéreos no tripulados.....	3
1.2 Vehículos aéreos no tripulados en el ecuador.....	4
1.3 Vehículos aéreos no tripulados en Riobamba.....	4
1.4 Trabajos relacionados.....	5
1.5 Vehículo aéreo no tripulado.....	7
1.6 Tipos de VANT.....	7
1.6.1 <i>Tricóptero</i>	7
1.6.1.1 <i>Metodología de Vuelo del tricóptero</i>	8
1.6.1.2 <i>Ventajas y Desventajas del tricóptero</i>	8
1.6.2 <i>Cuadricóptero</i>	9
1.6.2.1 <i>Metodología del vuelo del cuadricóptero</i>	10
1.6.2.2 <i>Ventajas y Desventajas del cuadricóptero</i>	11
1.6.3 <i>Hexacóptero</i>	11
1.6.3.1 <i>Ventajas y Desventajas del hexacóptero</i>	12
1.7 Aplicaciones.....	12
1.7.1 <i>Topografía</i>	12
1.7.2 <i>Aplicaciones geológicas</i>	13
1.7.3 <i>Búsqueda de personas desaparecidas</i>	13
1.7.6 <i>Agricultura</i>	15
1.7.6.1 <i>Monitoreo de cultivos</i>	15
1.7.6.2 <i>Conteo de plantas</i>	16
1.7.6.3 <i>Localización de estrés nutricional e hídrico en cultivos</i>	16
1.7.6.4 <i>Localización temprana de enfermedades</i>	16
1.7.6.5 <i>Microfumigación</i>	16
1.8 Funcionamiento del VANT.....	17
1.9 Control del VANT.....	19

1.10	Modos de vuelo	20
1.10.1	<i>Manual</i>	20
1.10.2	<i>Estabilizado</i>	20
1.10.3	<i>Autónomo</i>	20
1.11	Vuelo cooperativo.....	20
1.11.1	<i>Tipos de vuelo cooperativo</i>	20
1.12	Trayectoria	23
1.13	Controlador de vuelo	23
1.14	Tarjeta de desarrollo de hardware	24
1.15	Telemetría	25
1.16	Estación de control de tierra	26
1.16.1	<i>Software de estación de control de tierra</i>	27
1.16.2	<i>MAVLink</i>	27
1.17	Sistema operativo robótico	28
2.	MARCO METODOLÓGICO	29
2.1	Requerimientos del sistema	29
2.2	Concepción general de la arquitectura del sistema	29
2.3	Diseño de la arquitectura de los módulos del sistema	30
2.3.1	<i>VANT inicial</i>	30
2.3.2	<i>VANT terminal</i>	31
2.4	Selección de componentes del sistema	32
2.4.1	<i>Pixhawk 2.4.8</i>	33
2.4.2	<i>Raspberry Pi 3 Model B</i>	34
2.4.3	<i>Módulo de telemetría 3DR Radio 915 MHz</i>	36
2.4.4	<i>Transmisor RC FlySky Fs-i6X</i>	38
2.4.5	<i>Módulo GPS Ublox Neo M8N</i>	39
2.4.6	<i>Frame F450</i>	41
2.4.7	<i>Motor brushless 2212 / 920 KV</i>	42
2.4.8	<i>ESC BLHeli 30 A</i>	43
2.4.9	<i>Batería LiPo 3S 50C 5000 mAh</i>	44
2.4.10	<i>Hélices 10 x 4.5</i>	46
2.5	Esquema de conexiones del prototipo.....	50
2.5.1	<i>Conexiones de los motores</i>	50
2.5.2	<i>Conexiones del controlador de vuelo</i>	52
2.5.3	<i>Conexión de la tarjeta de desarrollo</i>	55
2.5.4	<i>Conexión del convertidor USB a UART</i>	57
2.6	Comunicación entre VANTs	57

2.6.1	<i>Multiplexación por división de tiempo (TDM)</i>	57
2.6.2	<i>Espectro expandido de salto de frecuencia (FHSS)</i>	59
2.7	Desarrollo del software del prototipo de vuelo cooperativo	61
2.7.1	<i>Paquetes para retransmisión de comunicación</i>	61
2.7.2	<i>Control de misión</i>	62
2.7.2.1	<i>Control de inicio</i>	63
2.7.2.2	<i>Interface de comandos</i>	63
2.7.2.3	<i>Monitor de estado del VANT</i>	64
2.7.2.4	<i>Control de la retransmisión de comunicación</i>	64
2.7.2.5	<i>Interfaz del controlador de vuelo</i>	64
2.7.2.6	<i>Interfaz del sistema de comunicación</i>	64
2.7.3	<i>Proceso de retransmisión</i>	64
2.7.3	<i>HMI de la estación de control de tierra</i>	66
2.8	Programación del controlador de vuelo	67
2.8.1	<i>Programación con Mission Planner</i>	68
2.8.2	<i>Configuración de modos de vuelo</i>	71
2.8.2.1	<i>Altitude Hold Mode</i>	72
2.8.2.2	<i>Loiter</i>	72
2.8.2.3	<i>RTL Mode</i>	72
2.8.2.4	<i>Auto Mode</i>	72
2.8.2.5	<i>Acro</i>	72
2.8.2.6	<i>Sport</i>	72
2.8.2.7	<i>Drift</i>	73
2.8.2.8	<i>Guided Mode</i>	73
2.8.2.9	<i>Circle Mode</i>	73
2.8.2.10	<i>Position Mode</i>	73
2.8.2.11	<i>Land Mode</i>	73
2.8.2.12	<i>Follow me Mode</i>	73
2.8.2.13	<i>Simple y Super simple Mode</i>	74
2.8.3	<i>Configuración de un plan de vuelo</i>	74
2.9	Programación de la tarjeta de desarrollo de hardware	75
2.9.1	<i>Scripts desarrollados</i>	76
2.10	Configuración del pulverizador para microfumigación	77
2.10.1	<i>Habilitación del pulverizador</i>	77
2.10.2	<i>Configuración del pulverizador</i>	78
2.11	Diseño realizado en SOLIDWORKS 2017	79
2.12	Implementación de los VANTs	80

3.	PRUEBAS Y RESULTADOS	83
3.1	Pruebas de los componentes de los VANTs	83
3.1.1	<i>Prueba de la batería</i>	83
3.1.2	<i>Prueba del controlador de vuelo</i>	84
3.1.3	<i>Prueba de los módulos de telemetría</i>	85
3.1.4	<i>Prueba del transmisor y receptor</i>	86
3.1.5	<i>Prueba del módulo GPS</i>	88
3.1.6	<i>Prueba de los motores y ESC</i>	89
3.1.7	<i>Prueba de la tarjeta de desarrollo de hardware</i>	90
3.2	Pruebas de vuelo individual de los VANTs	91
3.2.1	<i>Modo Loiter</i>	92
3.2.2	<i>Modo Auto</i>	95
3.3	Prueba del HMI para vuelo cooperativo	98
3.4	Pruebas del sistema de retransmisión para vuelo cooperativo	99
3.5	Análisis de resultados	102
3.6	Análisis de costos	106
	CONCLUSIONES	107
	RECOMENDACIONES	108
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2. Comparación de diferentes tecnologías inalámbricas.....	36
Tabla 2-2. Consumo de corriente de los elementos del VANT.....	45
Tabla 3-2. Peso de los elementos del VANT.....	49
Tabla 4-2. Instalación de los módulos de telemetría.....	55
Tabla 5-2. Saltos de frecuencia de los módulos de telemetría.....	60
Tabla 6-2. Tabla de direccionamiento del paquete de retransmisión.....	62
Tabla 7-2. Lista de comandos disponibles para el uso en la HMI.....	67
Tabla 1-3. Voltajes de las baterías de los VANTs.....	83
Tabla 2-3. Estado de los componentes de los controladores de vuelo de los VANTs.....	84
Tabla 3-3. Estado de las telemetrías de los VANTs.....	85
Tabla 4-3. Estado de los transmisores y receptores de los VANTs.....	87
Tabla 5-3. Estado de los módulos GPS de los VANTs.....	88
Tabla 6-3. Estado de los motores y ESC de los VANTs.....	89
Tabla 7-3. Estado de las tarjetas de desarrollo de hardware de los VANTs.....	91
Tabla 8-3. Datos de las pruebas de vuelo en modo loiter.....	92
Tabla 9-3. Datos de las pruebas de vuelo en modo auto.....	96
Tabla 10-3. Pruebas realizadas a la HMI.....	98
Tabla 11-3. Datos de las pruebas del sistema de retransmisión para vuelo cooperativo.....	100
Tabla 12-3. Resultados de las pruebas de normalidad.....	104
Tabla 13-3. Resultados de la prueba t de Student.....	105
Tabla 14-3. Análisis de costos.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Arquitectura del tricóptero.....	8
Figura 2-1. Arquitecturas del cuadricóptero.....	9
Figura 3-1. Arquitecturas del hexacóptero.....	12
Figura 4-1. Vuelo técnico para la recopilación de imágenes en la Geología.....	13
Figura 5-1. Búsqueda de personas en una VANT.....	14
Figura 6-1. VANT de primeros auxilios.....	14
Figura 7-1 VANT de uso militar para vigilancia.....	15
Figura 8-1. Microfumigación con VANT.....	17
Figura 9-1 Movimientos del Drone.....	18
Figura 10-1. Ejemplo de interacción física entre VANTs.....	21
Figura 11-1. Vuelo en formación.....	21
Figura 12-1 Enjambre de VANTs.....	22
Figura 13-1. Cooperación intencionada entre VANTs.....	22
Figura 14-1. Controladora de vuelo.....	24
Figura 15-5. Tarjeta de desarrollo Raspberry Pi3.....	25
Figura 16-1. Módulos de telemetría.....	26
Figura 17-7. Estación de Control de Tierra.....	26
Figura 18-1. Software QGroundControl.....	27
Figura 1-2. Controlador de vuelo Pixhawk 2.4.8.....	34
Figura 2-2. Tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 Model B.....	36
Figura 3-2. Módulo de telemetría 3DR Radio 915 MHz.....	38
Figura 4-2. Transmisor y receptor RC FlySky Fs-i6x.....	40
Figura 5-2. Módulo GPS Ublox Neo M8N.....	39
Figura 6-2. Frame F450.....	42
Figura 7-2. Motor brushless 2212 / 920 KV.....	43
Figura 8-2. ESC BLHeli 30 A.....	44
Figura 9-2. Batería LiPo 3S 50C 5000 mAh.....	45
Figura 10-2. Hélices 10 x 4.5 CW y CCW.....	48
Figura 11-2 HMI de la estación de control de tierra realizada en C#.....	67
Figura 12-2 Pantalla de selección del tipo de vehículo.....	68
Figura 13-2 Pantalla de selección del tipo de frame.....	69
Figura 14-2 Pantalla de selección del puerto COM correspondiente.....	69

Figura 15-2 Posiciones para la calibración de los acelerómetros del VANT.....	70
Figura 16-2 Calibración de la brújula.....	71
Figura 17-2 Ruta autónoma realizada en Mission Planner.....	74
Figura 18-2 Botón “Escribir WPs”.....	75
Figura 19-2 Script desarrollado para el sistema de vuelo cooperativo.....	77
Figura 20-2. Parámetros necesarios para activar y configurar el pulverizador.....	78
Figura 21-2. Valores PWM máximos y mínimos para el pulverizador.....	78
Figura 22-2 Modelo tridimensional del VANT realizado en SOLIDWORKS 2017.....	80
Figura 23-2. Soldadura de los ESC a los motores.....	81
Figura 24-2. Soldadura de los ESC a la placa de distribución.....	81
Figura 25-2. VANTs totalmente implementados.....	82
Figura 26-2. VANTs inicial y terminal.....	82
Figura 1-3. Pruebas realizadas a las baterías de los VANTS.....	84
Figura 2-3. Pruebas realizadas a los controladores de vuelo de los VANTS.....	85
Figura 3-3. Pruebas realizadas a los módulos de telemetría de los VANTS.....	86
Figura 4-3. Pruebas realizadas a los transmisores y receptores de los VANTS.....	87
Figura 5-3. Pruebas realizadas a los módulos GPS de los VANTS.....	89
Figura 6-3. Pruebas realizadas a los motores y ESC de los VANTS.....	90
Figura 7-3. Pruebas realizadas a las tarjetas de desarrollo de hardware de los VANTS.....	91
Figura 8-3. Pruebas de vuelo realizadas en modo loiter.....	94
Figura 9-3. Trayectoria a seguir por cada VANT en modo auto.....	98
Figura 10-3. Pruebas realizadas a la HMI.....	99
Figura 11-3. Trayectorias para las pruebas del sistema de retransmisión para vuelo cooperativo.....	100
Figura 12-3. Pruebas del sistema de retransmisión para vuelo cooperativo.....	102
Figura 13-3. Datos de las pruebas para el análisis estadístico en el software SPSS.....	103

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2. Arquitectura del sistema de vuelo cooperativo para microfumigación.....	30
Gráfico 2-2. Diagrama de bloques del VANT inicial.....	31
Gráfico 3-2. Diagrama de bloques del VANT terminal.....	32
Gráfico 4-2. Esquema de conexiones con motores y ESC.....	51
Gráfico 5-2. Correspondencia de las hélices con los motores.....	52
Gráfico 6-2. Posición de los motores en el frame.....	53
Gráfico 7-2. Conexión de motores y receptor de radio en el controlador de vuelo.....	53
Gráfico 8-2. Conexión de elementos y accesorios en el controlador de vuelo.....	54
Gráfico 9-2. Conexión de la tarjeta de desarrollo del VANT terminal.....	56
Gráfico 10-2. Conexión de la tarjeta de desarrollo del VANT inicial.....	56
Gráfico 11-2. Conexión del módulo de telemetría y convertidor USB a UART.....	57
Gráfico 12-2. Principio de funcionamiento de la multiplexación por división de tiempo...	58
Gráfico 13-2. Diagrama de flujo de la multiplexación por división de tiempo (TDM).....	59
Gráfico 14-2. Salto de frecuencias de telemetrías.....	60
Gráfico 15-2. Formato del paquete de retransmisión.....	62
Gráfico 16-2 Diagrama de bloques del control de misión.....	63
Gráfico 17-2. Diagrama de flujo de retransmisión en el VANT terminal.....	65
Gráfico 18-2. Diagrama de flujo de retransmisión en el VANT inicial.....	65
Gráfico 1-3. Porcentaje de pruebas de vuelo en modo Loiter.....	94
Gráfico 2-3. Porcentaje de pruebas de vuelo en modo auto.....	97
Gráfico 3-3. Gráfico Q – Q normal para pruebas de vuelo auto.....	104
Gráfico 4-3. Gráfico Q – Q normal para pruebas de vuelo cooperativo.....	105

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	Datasheet del controlador de vuelo Pixhawk
ANEXO B	Datasheet de la tarjeta de desarrollo de hardware Raspberry Pi 3
ANEXO C	Datasheet del convertidor USB-UART CP2102
ANEXO D	Resultados de la prueba de normalidad
ANEXO E	Resultados de la prueba t de Student

RESUMEN

Se diseñó y construyó un prototipo de sistema de vuelo cooperativo para vehículos aéreos no tripulados (VANTs) enfocado a aplicaciones de microfumigación. Está conformado por dos VANTs denominados inicial y terminal, los cuales cumplen con los requerimientos planteados. Para hacer posible el vuelo cooperativo un cuadirrotor retransmite la comunicación por radio a otro cuadirrotor. Una parte modular de la investigación fue hacer viable la retransmisión de comunicación, realizada por módulos comerciales de telemetría para el intercambio de información entre las aeronaves. Se utilizó técnicas de multiplexación por división de tiempo (TDM) y espectro expandido de salto de frecuencia (FHSS) para que la presencia de varias telemetrías no produjese interferencias de radio frecuencia. Para el control autónomo de la misión, de retransmisión y de tierra se desarrolló un conjunto de programas escritos en C++, además, de una interfaz de usuario realizada en C# para el envío de comandos y la supervisión de datos y estado del vuelo. Se realizaron 15 pruebas de vuelo en modo auto y la estación de control de tierra era capaz de manejar un solo VANT a la vez y la distancia recorrida en promedio fue de 665.4 metros. Con el prototipo de sistema de vuelo cooperativo se ejecutó el mismo número de ensayos, pero con la capacidad de usar 2 VANTs por lo cual el promedio de la distancia recorrida ascendió a 1349.33 metros. Se encontró una diferencia estadísticamente significativa en la distancia recorrida de las pruebas al realizar la prueba de t de Student por lo que se concluye que el prototipo es capaz de abarcar más terreno en el mismo tiempo haciéndolo muy óptimo. Se recomienda centralizar el intercambio de información en una plataforma tecnológica para el control multi VANT.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, <ROBÓTICA>, <VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (VANT)>, <VUELO COOPERATIVO>, <TELEMETRÍA>.

SUMMARY

The present investigation shows that a prototype cooperative flight system was designed and built for unmanned aerial vehicles (UAVs) focused on microfumigation applications. It is made up of the initial and terminal (UAVs), which comply with the requirements. Making cooperative flight possible, a drone radio communication to another drone. A modular part of the research was to make the retransmission of communication viable, carried out by commercial telemetry modules for the exchange of information between aircraft. Time division multiplexing (TDM) and frequency hopping expanded spectrum (FHSS) techniques were used, so that the presence of several telemetries did not produce radio frequency interference. For the autonomous control of the mission relay and ground, a set of programs written in C ++ was developed, in addition to a user interface made in C # for sending commands and monitoring data and flight status. Fifteen flight tests were conducted in auto mode, the ground control station was able to handle only one (UAVs) at a time and distance traveled on average was 665.4 meters. With the prototype cooperative flight system, it was executed the same number of trials, but with the ability to use two (UAVs) the average distance traveled amounted to 1349.33 meters. A statistically significant difference was found in the distance traveled from the tests when the Student t-test was carried out, so it is concluded that the prototype is capable of covering more ground in the same time, making it very optimal. It is recommended to centralize the exchange of information in a technological platform for multi-UAV control.

Keywords: <TECHNOLOGY AND SCIENCES OF ENGINEERING>, <AUTOMATIC CONTROL>, <ROBOTIC>, <UNWRITTEN AIR VEHICLE ((UAVs))>, <COOPERATIVE FLIGHT>, <TELEMETRY>.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

DAC	Dirección General de Aviación Civil
GPS	Sistema de posicionamiento global
MAV	Vehículo aéreo micro
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
RPA	Avión pilotado remotamente
UAV	Unmanned aerial vehicle (Vehículo aéreo no tripulado)
VANT	Vehículo aéreo no tripulado
TDM	Multiplexación por división de tiempo
FHSS	Espectro expandido de salto de frecuencia
ESC	Electronic Speed Controller
RC	Radio Control
ID	Identificador
GCS	Estación de control de tierra (Ground Control Station)
CW	Giro horario (clockwise)
CCW	Giro anti horario (counter clockwise)
USB	Universal Serial Bus
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
mAh	Mili amperio hora
LiPo	Litio – polímero
CMD	Comando
HMI	Interfaz humano – máquina

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los vehículos aéreos no tripulados o VANT por sus siglas en español, aunque también son conocidos como drones han demostrado ser herramientas de gran capacidad y poder para diferentes aplicaciones ya sean militares o civiles.

Algunos de los problemas presentados al usar o manejar un drone son la poca experiencia de los operarios para controlar el mismo, la dificultad del hardware y del software para programarlo y el principal problema es la autonomía y la duración de la batería para cumplir con una misión encomendada.

Varias investigaciones avalan a los drones para ser aplicados en la mitigación de problemas en donde se involucre la supervisión de algún conocimiento o fenómeno. Enfocándose en el campo agrícola una de las necesidades es la de combatir cualquier tipo de plagas y la solución más adecuada es la fumigación.

Considerando las variables caracterizadoras de los cultivos como tamaño y tipo de planta, condicionan a escoger el tipo de fumigación a utilizar por ejemplo para plantas de pequeño tamaño lo más adecuado es la microfumigación.

Para ayudar al cumplimiento de las misiones encomendadas a drones es importante la utilización de un sistema de vuelo cooperativo conformado por n drones para así poder cumplir con el objetivo encomendado superando aspectos como la autonomía y duración de la batería.

El uso de drones para microfumigación en terrenos con geografía brusca o localizados en laderas o peñascos y donde no puedan ingresar las maquinarias convencionales para fumigación ayudando de gran manera al campo agrícola y a la producción para no afectar la misma.

OBJETIVOS

General:

Diseñar y construir un prototipo de sistema para vuelo cooperativo de vehículos aéreos no tripulados para tareas de microfumigación.

Específicos:

Estudiar las características de los vehículos aéreos no tripulados.

Analizar los requerimientos del prototipo de sistema de vuelo cooperativo para tareas de microfumigación a implementar.

Determinar el diseño que permita cumplir con el prototipo de sistema de vuelo cooperativo.

Determinar el hardware y software necesario para cumplir con el diseño del prototipo de sistema de vuelo cooperativo.

Evaluar si el prototipo de sistema de vuelo cooperativo cumple con su función.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Orígenes de los vehículos aéreos no tripulados

En los últimos noventa años los vehículos aéreos no tripulados han sido tendencia y revolución tanto en el campo civil como militar. En 1918 Charles Kettering desarrolla una máquina voladora controlada por un giroscopio y la cual explotaría al cumplir un cierto número de giros con la hélice. (Sullivan, 2015)

En el transcurso de la segunda guerra mundial se usaron brevemente misiles balísticos. Ya en la guerra fría los drones han sido utilizados para prácticas de tiro de la fuerza aérea y marina en la década de los 50.

Los drones de 1950, en la década de los 60 se convirtieron en vehículos pilotados a distancia y en los 70 esta re categorización han creado confusión sobre lo nuevo y lo viejo, lo cual es revolucionario y lo cual simplemente se replantea. (Sullivan, 2015)

En la última década los vehículos aéreos no tripulados han tenido un gran impulso comercial y son utilizados para diversos usos, principalmente en la fotografía y se ha visto como la industria de los mismos han crecido exponencialmente, aunque, las leyes de aviación civil sean cada vez más restrictivas.

Las estadísticas a nivel mundial apuntan para el 2020 en Estados Unidos existirán un número proyectado de 7000000 drones y para el 2018 unos 600000. Las fuerzas armadas estadounidenses utilizan un número aproximado de 770000. Actualmente la industria de drones está valuada en 13 mil millones, pero para el 2020 se espera una valuación de 90 mil millones. (DMR, 2018)

1.2 Vehículos aéreos no tripulados en el Ecuador

En el Ecuador, los vehículos aéreos no tripulados han tenido un verdadero auge desde el año 2015 a diferencia de países desarrollados como Estados Unidos en donde este tipo de aeronaves ya eran usadas en décadas pasadas. Sin embargo, es importante definir los usos dados los cuales deben concordar con la realidad de cada país. (El Comercio, 2018)

El uso de los vehículos aéreos no tripulados principalmente en el campo periodístico ha sido muy importante por ejemplo en la cobertura de eventos como el terremoto ocurrido en abril de 2016.

Según Jorge Cruz director de la escuela de Comunicación de la PUCE, explica el uso de los drones en el sector comercial y turístico con la captura de imágenes para promocionar cualquier lugar a los turistas. (El Comercio, 2018)

A más del uso en el periodismo, en el país se ocupa este tipo de artefactos para la seguridad de eventos públicos, búsqueda de personas, control de incendio y vigilancia fronteriza. Mediante el uso de las antenas del ECU – 911 las imágenes capturadas son enviadas y visualizadas en tiempo real. (Sistema Integrado de Seguridad ECU 911, 2017)

La Dirección de Aviación Civil, dentro de sus competencias legales y por la resolución 251 ha establecido normas por ejemplo una aeronave no tripulada no puede volar a más de 122 m y tampoco a 9 km a la redonda de bases militares o aeropuertos. Además, la persona encargada de manejar los mismos debe contratar una póliza de seguros por la posibilidad de accidentes y la responsabilidad frente a terceros. (DAC, 2015)

1.3 Vehículos aéreos no tripulados en Riobamba

En la ciudad de Riobamba, los vehículos aéreos no tripulados son utilizados por entidades públicas, como el Municipio para promocionar a la ciudad y cubrir eventos organizados por el mismo.

Otro ejemplo es el uso dado por un grupo de investigadores de la Universidad Nacional de Chimborazo, y con la ayuda de un vehículo aéreo no tripulado en la parroquia rural de Flores han encontrado vestigios de la cultura Puruha y software especializado ha permitido la identificación de la organización territorial de la misma. (El Telegrafo, 2018)

A nivel de instituciones de educación superior el Club de Robótica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo organiza concursos de robótica con diferentes categorías entre las cuales se encuentran dron libre y dron destreza, atrayendo la atención de cada vez más estudiantes y personas. (Club Robótica ESPOCH, 2018)

1.4 Trabajos relacionados

Varias investigaciones realizadas en años pasados hacen uso de VANTs para diferentes aplicaciones y se destacan algunas de las importantes y llamativas.

En experimentos controlados, Quilter y Anderson en el año 2001 demostraron el uso de VANTs pequeños para monitorear la biomasa de pastizales. (Quilter & Anderson, 2001)

En el año 2005 Perry J. Hardin y Mark W. Jackson realizan una investigación acerca de un vehículo aéreo no tripulado para fotografía de pastizales donde tenían 2 objetivos. El primero fue obtener fotografías a baja altitud y gran escala para documentación de los pastizales y el segundo evaluar las características de vuelo. (Hardin & Jackson, 2005)

En el 2016, redes de comunicaciones de nueva generación como la 5G son importantes para aumentar el alcance y velocidad principalmente del internet en dispositivos móviles, pero el tráfico generado, es un punto importante a considerar y se plantea el uso de drones en puntos específicos con la tecnología necesaria para mitigarlo, los mismos son alimentados por un cable y no tienen comunicación entre sí. (Jaziri, Nasri and Chahed, 2016)

En el mismo año, otra investigación se basa en monitorear el estado de las carreteras con la ayuda de un dron, el cual con técnicas de inteligencia y visión artificial realizaba vuelos a baja altitud

y junto con procesamiento digital de imágenes y algoritmos especializados puede dar un criterio acerca de la carretera. (Kaaniche, Demonceaux and Vasseur, 2016)

Otra de las investigaciones realizadas en el 2017, plantea la posibilidad de utilizar un drone para asistencia médica. Una ambulancia en el momento de una emergencia puede sufrir demoras por atascos en el tráfico y otras circunstancias. El drone con la ayuda de sensores y diversas herramientas puede medir los signos vitales de una persona y enviar estos datos georreferenciados. (Dhivya and Premkumar, 2017)

Respecto a implementar VANT capaces de comunicarse entre sí mismo y con una estación de tierra las investigaciones se ven reducidas y se destacan las siguientes:

En el 2014, se presenta la primera contribución al vuelo autónomo de formación de VANTs, el requirió grandes esfuerzos en robótica y redes inalámbricas de sensores solo por nombrar algunas. Se ha examinado la relación entre la fiabilidad de la red y el cálculo del control, y se desarrolló un simulador de redes integrado. Las lecciones aprendidas servirán para diseñar un plan de acción e investigación para años venideros. (Ciarletta *et al.*, 2014)

En el año 2015 se presenta el Proyecto AWARE, Integración de Vehículos Aéreos no Tripulados con Redes Inalámbricas de Sensores y Actuadores donde dicha plataforma opera de forma robusta y escalable en entornos en donde no hay infraestructuras, o en situaciones las cuales han sido dañadas o destruidas. La escalabilidad con el número de vehículos y sensores se logró gracias al diseño descentralizado de la arquitectura. Asimismo, el sistema tiene capacidades de auto-despliegue, autoconfiguración y auto-reparación por medio del uso de helicópteros autónomos cooperativos. (Guerrero, Gonzales, Vega, & Tovar, 2015)

La cooperación de drones pequeños y minis en una red mejora el rendimiento y cobertura de los VANTs. En el 2017, se presenta el análisis de una estructura FANET y protocolo para así elegir entre varios algoritmos la selección de puerta de enlace distribuida y mecanismos de control para la estabilidad basados en la nube. (Wang *et al.*, 2017)

Por último, en el 2018, se realiza el análisis de árbol de fallas para determinar la fiabilidad de las comunicaciones entre VANTs y la estación a tierra para así mejorar la confiabilidad del sistema en general y la misión encargada a los mismos se cumpla con total éxito. (Abdallah *et al.*, 2017)

1.5 Vehículo aéreo no tripulado

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT), avión pilotado remotamente (RPA) o comúnmente conocido como DRONE, es una aeronave manipulada o controlada por una persona desde una estación de control de tierra. El control de modo de vuelo no es necesariamente manual, lo cual permite realizar vuelos asistidos o automáticos, además, como medida de seguridad una persona debe presentarse en su continuo seguimiento para ejercer mando por si existe alguna colisión. (Li *et al.*, 2016)

La gran acogida de estos vehículos aéreos no tripulados ha producido efectos a las autoridades aeronáuticas por ejemplo la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha tomado en consideración la creación de estas aeronaves y se ha ido cambiando la normativa con el propósito de mantener los estándares de seguridad.

La causa antes mencionada ha llevado a modificar la definición de aeronave por lo cual ya se toman en cuenta a los VANTs dentro de la misma. (Vergara *et al.*, 2015)

1.6 Tipos de VANT

En forma general se puede clasificar a los VANT de la siguiente manera:

1.6.1 *Tricóptero*

Este tipo de VANT es el más fácil para ser creado, su estructura consta de tres brazos los cuales sobresalen del centro del drone, está constituido por un servomotor, tres motores con sus respectivas hélices y variadores de velocidad o reguladores.

En los tricópteros el control de vuelo es mediante motores, estos se controlan aumentando y disminuyendo la velocidad. Al aumentar la velocidad se elevará de forma prolongada hacia el cielo y si se disminuye la velocidad este se dirigirá al suelo.

Por medio del servomotor el drone obtiene un cuarto punto de giro para controlar el mecanismo de giro, gracias a esta instancia se logra la estabilidad y equilibrio del mismo. Además, tiene la ventaja de despegar y aterrizar en forma vertical, así como los drones de ala fija.(Fleeson *et al.*, 2017)

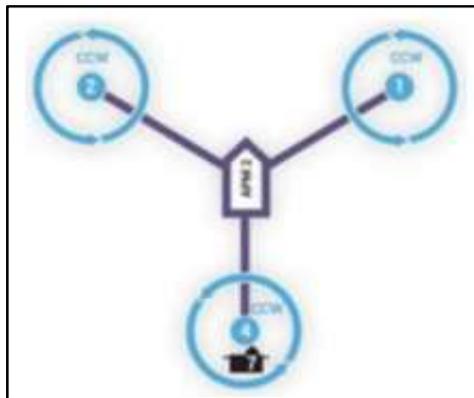


Figura 1-1. Arquitectura del tricóptero

Fuente: (Benito, et al. 2015)

1.6.1.1 Metodología de Vuelo del tricóptero

El tricóptero se controla por medio del número de revoluciones, para lograr el vuelo, se debe colocar dos motores en dirección opuesta para provocar la oscilación de un lado a otro del motor y esto sucede gracias al motor sobrante el cual disminuye sus revoluciones. El tercer motor se lo llama de cola y se usa para la estabilidad; al subir o bajar la potencia ayuda a la inclinación por lo cual se puede avanzar o retroceder y el servomotor situado bajo el motor de cola ayuda a girar la aeronave en su propio eje. (Fleeson *et al.*, 2017)

1.6.1.2 Ventajas y Desventajas del tricóptero

Ventajas:

- Fácil manejo y transporte

- Su construcción consta de pocos componentes y básicos.
- Económico
- Ligero
- Su parte frontal consta de una amplia visión
- Espacio cómodo (Reducido)
- Pueden ser plegables según su construcción

Desventajas:

- Si existe alguna avería, este VANT descenderá sin control.
- De empuje bajo y no es óptimo para grandes cargas.
- Su configuración es avanzada.
- Su estabilidad y potencia es bajo en relación a otras VANTS.
- No tiene protección su chasis.
- Al volar sus motores trabajan a grandes revoluciones.
- No tiene variedad su diseño no cambia.

1.6.2 Cuadricóptero

Su representación es muy común en los VANTs existentes en el mercado, están compuestos por 4 hélices equidistantes, cada una con un motor de corriente continua y es importante usar motores sin escobillas para evitar contratiempos o desastres. (Fleeson et al., 2017)

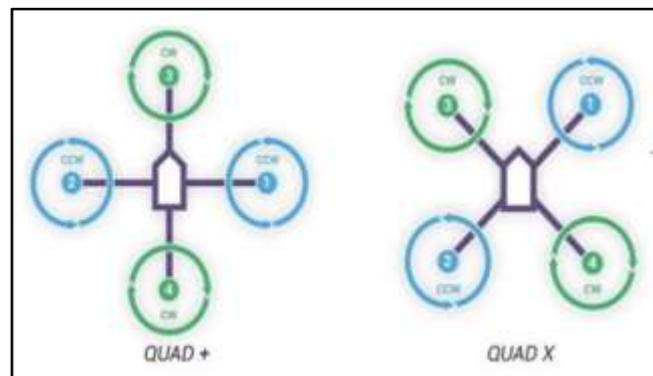


Figura 2-1. Arquitecturas del cuadricóptero

Fuente: (Benito, et al. 2015)

1.6.2.1 Metodología del vuelo del cuadricóptero

Para lograr subir o bajar el dron debe aumentar o disminuir las revoluciones del motor.

La estabilidad se crea a través del sentido de giro de los motores, dos de ellos deben ser colocados para girar en dirección anti horaria y los otros dos en dirección horaria, así se logra neutralizar la fuerza generada en el centro del VANT.

Para lograr el giro vertical del VANT se necesitan de varias fuerzas, las cuales son neutralizadas para lograr un desequilibrio entre los motores derecho e izquierdo, es decir la velocidad de los mismos deben ser proporcionalmente diferentes.

La rotación en su propio eje se logra por medio del propulsor, el cual, rota a revoluciones muy elevadas, entonces el motor contrario disminuirá sus revoluciones proporcionalmente, dando como resultado la rotación.

Se debe tomar en cuenta es la suma de las fuerzas iniciales las cuales deben ser iguales a la suma de las fuerzas en el estado de movimiento del VANT, al ser estas distintas el mismo caería en picada.

Se pueden configurar los rotores de dos formas diferentes en cruz o en X.

La estructura en cruz es la más cómoda y fácil de maniobrar porque al desplazarse de forma vertical y horizontal un solo motor tiene el control y cambio de sentido.

La estructura en X debe colocar los motores a 45° grados uno del otro para lograr el desplazamiento, de esta forma los cuatro motores no intervienen en la visualización de cámaras y por ende esta estructura es la más conveniente para videos o fotos. (Fleeson et al., 2017)

1.6.2.2 *Ventajas y Desventajas del cuadricóptero*

Ventajas:

- Componentes fáciles de controlar o manipular
- De aceleración rápida
- Estructura fácil y sencilla
- Puede llevar más carga en comparación al tricóptero
- Robusto
- Variedad de formas y colores en el mercado

Desventajas:

- Limitada velocidad y aceleración
- Su diseño no permite ser plegable
- Transporte o carga con límite

1.6.3 *Hexacóptero*

Este VANT está formado por seis hélices con sus respectivos motores y controladores de velocidad.

La sistemática del hexacóptero es parecida a la del cuadricóptero por los motores los cuales ubicados a un mismo nivel equidistante y por ende tres motores van a girar en sentido contrario a las manecillas del reloj y los tres restantes opuestos a los anteriores.

La estructura del hexacóptero varía según la creación de usuario por lo cual existen diferentes formas de posicionamiento de los motores. (Fleeson et al., 2017)

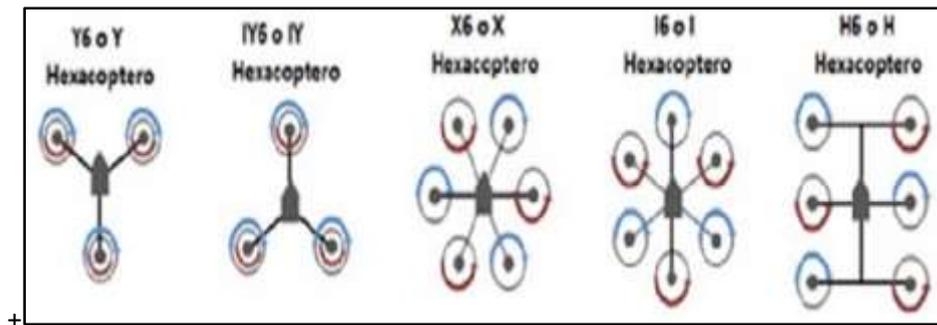


Figura 3-1. Arquitecturas del hexacóptero
Fuente: (Ruipérez, et al. 2016)

1.6.3.1 Ventajas y Desventajas del hexacóptero

Ventajas:

- Mayor estabilidad en comparación a los cuadricópteros
- Transporta cargas más grandes.
- Su estructura permite adquirir más accesorios.

Desventajas:

- Precios elevados.
- Son menos compactos.
- Necesita más energía para abastecer a los motores.
- Transporte tedioso
- Su estructura no permite ser plegable.

1.7 Aplicaciones

1.7.1 Topografía

Los VANTs han ayudado en la topografía, al obtener fotos e imágenes sobre la elevación del terreno para la construcción y también a verificar superficies y catástrofes. (Ambrojo, 2013)

1.7.2 Aplicaciones geológicas

Los VANT mediante su sistema de fotografía y video pueden tomar orto fotografías y modelos digitales de alta definición, estas son de gran ayuda para los geólogos.

Estos estudios abarcan a los campos de la paleontología, la geomorfología. Estas ciencias ayudan a la conservación de mares o del patrimonio natural. (Fernández-Lozano and Gutiérrez-Alonso, 2016)



Figura 4-1. Vuelo técnico para la recopilación de imágenes en la Geología
Fuente:(Fernández-Lozano and Gutiérrez-Alonso, 2016)

1.7.3 Búsqueda de personas desaparecidas

Un VANT es un instrumento excelente para la búsqueda de personas en lugares grandes y abiertos, estos pueden realizar búsquedas en zonas montañosas, bosques, nevados o selvas. Ayudan a buscar más rápidamente y sin exponer al personal de asistencia. (Melinton, 2017)



Figura 5-1. Búsqueda de personas en una VANT
Fuente: (Melinton, 2017)

1.7.4 Primeros Auxilios

A estos VANTS se los usan para llevar o transportar medicinas a lugares difíciles de pasar o lugares los cuales han sufrido algún desastre natural y por ende las carreteras están en avería. El programa Life Support se dedica a combatir la mortalidad infantil con la ayuda de vehículos aéreos para toman los pulsos cardiacos, la temperatura y los signos vitales, por medio de sensores, además, pueden llevar pintas de sangre para realizar el debido análisis. (Melinton, 2017)



Figura 6-1. VANT de primeros auxilios
Fuente: (Melinton, 2017)

1.7.5 Militares y Vigilancia de narcotraficantes

Un VANT es de gran ayuda para la planificación de tácticas especiales en contra de la delincuencia, de esta forma no se arriesga vidas y toman datos, imágenes o videos en tiempo real de la búsqueda llevada a cabo.

En Estados Unidos este dispositivo permite detectar personas ilegales o narcotraficantes en la frontera con México. (Melinton, 2017)



Figura 7-1. VANT de uso militar para vigilancia
Fuente: (Melinton, 2017)

1.7.6 Agricultura

Existen diferentes tipos de VANT para la agricultura, estos pueden ser utilizadas según el beneficio, uso o necesidad. Entre ellas tenemos:

1.7.6.1 Monitoreo de cultivos

Consiste en usar cámaras de alta definición para tomar fotografías del terreno, el posicionamiento se realiza por medio de GPS para permitir información georreferenciada y por ende ayuda a realizar la operación con exactitud. El vuelo no es necesariamente manual al programar al VANT en una ruta o una misión en modo autónomo. (Franco and Martillo, 2018)

1.7.6.2 *Conteo de plantas*

Se toma fotografías y esta información se va procesando mediante un software, esto ayuda al conteo rápido y fácil de plantas para saber la totalidad de sembradío en el terreno. (Franco and Martillo, 2018)

1.7.6.3 *Localización de estrés nutricional e hídrico en cultivos*

Mediante el vuelo del VANT, la cámara, va detectando el estrés hídrico o falta de agua y de igual manera la falta de ingredientes para la nutrición y crecimiento de la planta. (Franco and Martillo, 2018)

1.7.6.4 *Localización temprana de enfermedades*

El VANT realiza una inspección, donde fotografía todo el terreno y mediante las imágenes captadas, un software va procesando la información y verificando el estado, color y apariencia de la planta, de este modo se evita el contagio de las plantas enfermas a las saludables. (Franco and Martillo, 2018)

Algunas prácticas o usos se los ha llevado a cabo para verificar si el cambio de temperatura afecta a las plantas, si el exceso de agua las ahoga o si los fertilizantes no están actuando positivamente en ellas. (Franco and Martillo, 2018)

Estas prácticas se han llevado a cabo en:

- Arrozales
- Vinicultura
- Inspección de cultivos
- Agricultura de precisión

1.7.6.5 *Microfumigación*

La microfumigación es un tratamiento de control de plagas basado en el uso de fumigantes para terrenos con cultivos pequeños y sensibles a la cantidad de fumigante. (Rentokil, 2018)

Un fumigante es un agente químico el cual, a temperatura y presión normal, se encuentra en forma gaseosa y puede mantenerse a una concentración suficiente para eliminar las plagas. Son diferentes de los humos (partículas sólidas dispersas en el aire) y de las nebulizaciones o aerosoles (partículas líquidas dispersas en el aire). (Rentokil, 2018)

Dentro de las ventajas de la microfumigación se encuentran:

- Los fumigantes se difunden y penetran en ranuras, grietas y mercancías eliminando las plagas en todas las fases de su ciclo de vida.
- Pueden alcanzarse niveles de eliminación de las plagas superiores al 99%.
- Cuando se utilizan a las concentraciones correctas y adecuadas, dejan residuos insignificantes y se pueden utilizar con seguridad para tratar productos alimentarios.
- Debido a su poder de penetración, pueden ser utilizados en lugares donde cebos, polvos o aerosoles no serían eficaces.



Figura 8-1. Microfumigación con VANT
Fuente: (Briones, 2018)

1.8 Funcionamiento del VANT

Un VANT, funciona por medio de 4 hélices, dos de ellas giran de acuerdo a las manecillas del reloj y las otras dos siguientes viceversas a las anteriores. Estas se acoplan de cada uno de los motores para lograr su funcionamiento.

Los movimientos del VANT dependen de la potencia o conexión de los motores, por ejemplo, si se aumenta la potencia en las cuatro hélices este puede ascender o descender, si se disminuye la potencia en las 2 hélices frontales este tendrá un vuelo donde se inclinará hacia adelante para desplazarse de manera frontal o lateral. (Torres and Méndez, 2015)

El movimiento del drone se puede manejar mediante la variación de velocidades de hélices y rotor.

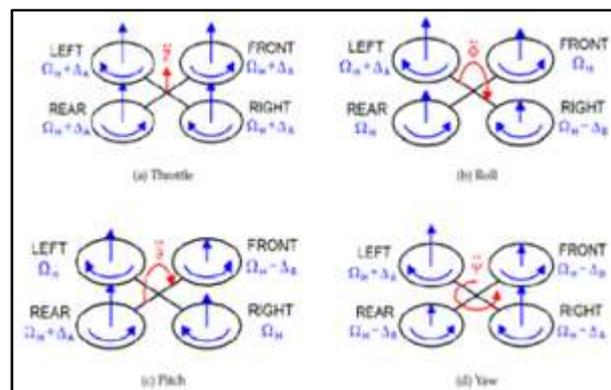


Figura 9-1 Movimientos del Drone

Fuente: (Torres and Méndez, 2015)

El movimiento del dron no será factible si se aplica una potencia directa a los 4 motores, de esta manera no existiría el control completo sobre estos elementos. (Torres and Méndez, 2015)

Esta causa lleva a tomar en cuenta cuatro variables las cuales son de gran ayuda para la estabilidad del VANT y son:

- Pitch: esta consigna permite el desplazamiento frontal por medio del ángulo de rotación sobre sí mismo.
- Roll: esta consigna permite el desplazamiento al costado o lateral por medio del ángulo de rotación sobre sí mismo.
- Yaw: relata la rapidez, por medio del eje z.
- Velocidad vertical: permite el desplazamiento vertical.

Estas son consignas están evaluadas por [1,-1] tomando a 0 como un valor anulado. El [1,-1] en la velocidad vertical actúa de forma contraria, cuando se tenga un 1 este ascenderá a la velocidad máxima, por lo tanto, con -1 el drone desciende a la velocidad mínima. (Torres and Méndez, 2015)

1.9 Control del VANT

La técnica del control PID por lo general es la más utilizada para el control de un VANT y a continuación se describen sus características más importantes:

Para una respuesta rápida se escoge una ganancia P (proporcional) lo más alta posible para minimizar el error de seguimiento, pero sin introducir oscilaciones al sistema. (Mou *et al.*, 2016)

- Se verán oscilaciones de alta frecuencia si la ganancia P es demasiada grande.
- El VANT se comportará lentamente a cambios en la entrada si la ganancia P es demasiada baja.

Para evitar rebasamientos es necesario escoger la ganancia D (derivada), la responsable de la amortiguación. (Mou *et al.*, 2016)

- Si los motores del VANT se comportan inestablemente es porque la ganancia D está muy alta y quizá los mismos se calienten por la amplificación del ruido.
- Los sobre impulsos serán evidentes si la ganancia D es demasiada baja.

Por último, la ganancia I (integral) se encarga de guardar la memoria del error. Si la tasa deseada no es alcanzada por un lapso de tiempo, el término I aumentará. (Mou *et al.*, 2016)

- Si se observan oscilaciones lentas, la ganancia I es demasiada alta.
- Si durante un tiempo más prolongado, existe un desplazamiento entre la tasa deseada y la real, entonces la ganancia I es demasiada baja.

1.10 Modos de vuelo

De forma general existen diferentes modos de vuelo y se los clasifica desde el menos al más autónomo.

1.10.1 Manual

El balanceo, cabeceo, guiñada y aceleración son controlados directamente por el usuario para calcular los valores de salida en un lazo de control abierto. (Crespo *et al.*, 2014)

1.10.2 Estabilizado

Los controles de balanceo, cabeceo, guiñada y aceleración son re alimentados como puntos de consigna para calcular los valores de salida en un lazo de control cerrado. Los controles están en modo manual sin embargo la altitud del VANT está estabilizada en el espacio 3D. (Crespo *et al.*, 2014)

1.10.3 Autónomo

El VANT sigue los puntos de referencia de GPS establecidos por una estación a tierra. (Crespo *et al.*, 2014)

1.11 Vuelo cooperativo

Un vuelo cooperativo es donde vehículos aéreos no tripulados o aeronaves, facilitan datos sobre la ruta, posición, velocidad, dirección, etc. Gracias a este tipo de vuelo, predecir posibles colisiones y actuar en consecuencia es realizable. (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

1.11.1 Tipos de vuelo cooperativo

Interacción física: para este tipo de vuelo los VANTs, están conectados físicamente, entonces, cualquier movimiento realizado debería coordinarse con las maniobras de las otras aeronaves. Un ejemplo se puede ver en aplicaciones para levantar un objeto pesado y por el numero utilizado

generalmente bajo se puede utilizar arquitectura de control distribuida o central. (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

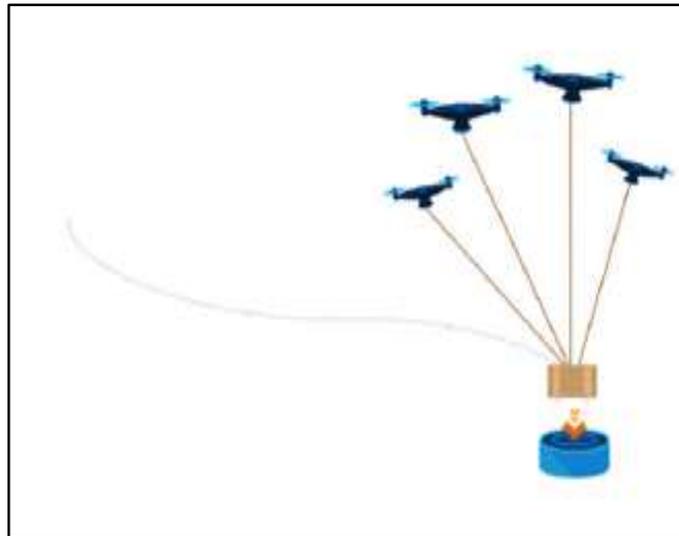


Figura 10-1. Ejemplo de interacción física entre VANTs
Fuente: (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

Formación: en este vuelo una conexión física entre VANTs no existe, pero de igual manera sus movimientos deberían coordinarse para mantener la formación. Por lo general se utiliza arquitecturas de control descentralizadas. (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

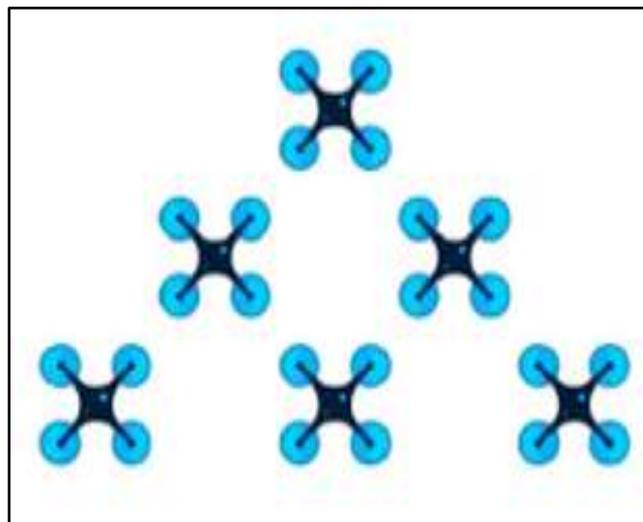


Figura 11-1. Vuelo en formación
Fuente: (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

Enjambre: las aeronaves en este tipo de vuelo son un conjunto homogéneo con la capacidad para interactuar con un bosquejo de vuelo dinámico. Al usar un número elevado se requiere de manera

imperativa el uso una arquitectura de control descentralizada. (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)



Figura 12-1. Enjambre de VANTs
Fuente: (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

Cooperación intencionada: los VANTs para este tipo de vuelo, se mueven a través de trayectorias antes definidas para el cumplimiento de tareas individuales y por último el cumplimiento del objetivo global. Los problemas deben ser resueltos de acuerdo a las características de la misión y de las aeronaves utilizadas. (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

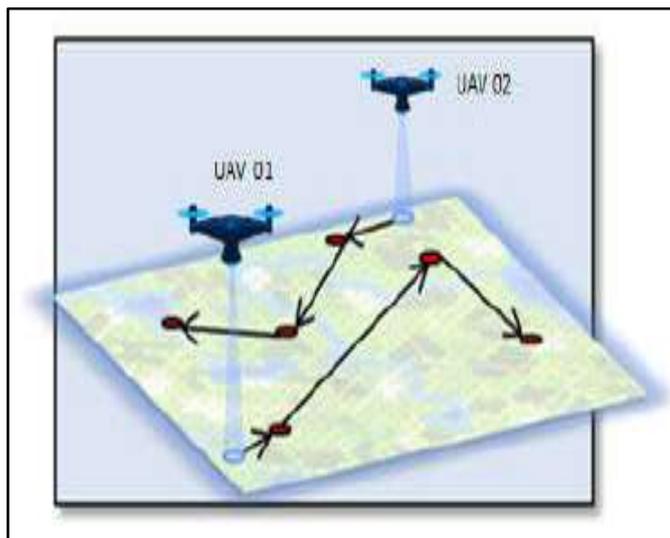


Figura 13-1. Cooperación intencionada entre VANTs
Fuente: (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

1.12 Trayectoria

Dentro de la cinemática, la trayectoria es la sucesión de posiciones por donde un cuerpo debe pasar cuando esté realizando un movimiento. Va a depender de gran manera del punto de vista del observador el cual determinara el sistema de referencia. (Burbano de Ercilla, Burbano García and Gracia Muñoz, 2015)

En un vehículo aéreo no tripulado una trayectoria es el camino a cumplir el cual está dado, a través, de coordenadas y comunicándose con una estación a tierra. (Pulecio, 2018)

1.13 Controlador de vuelo

El controlador de vuelo es una parte primordial en un VANT, es el sistema de control principal del mismo, y de manera general contienen los siguientes componentes:

- **Procesador:** es el encargado leer todas las cadenas de datos recibidas de los diferentes sensores y actuar lo más rápido posible por lo general en operaciones por segundo entonces debe ser potente y versátil.
- **Magnetómetro:** es uno de los componentes principales y actúa como una brújula permitiendo conocer en cualquier momento la dirección hacia donde se encuentra apuntado la cara frontal.
- **Giroscopio:** ayuda a la medición de la velocidad angular cuando se produce cambios de posición.
- **Acelerómetro:** este componente ayuda con la medición de la inercia al realizar diferentes movimientos.
- **Sensor Barométrico:** es usado para conocer la altura con gran precisión.
- **GPS:** es utilizado para determinar las coordenadas precisas, para realizar vuelos autónomos.

Para la toma de decisiones correctas sobre los diferentes actuadores para permitir un vuelo satisfactorio, la combinación de todos los componentes antes mencionados es muy importante para proporcionar la información necesaria. (Feng and Fangchao, 2016)



Figura 14-1. Controladora de vuelo

Fuente: (Emmanuel Santana Cruz and Moreno Ortiz, 2017)

1.14 Tarjeta de desarrollo de hardware

Una placa de desarrollo de hardware es una placa de circuito pequeña y compacta, en donde un microprocesador o microcontrolador es cubierta por la misma y además suministra los componentes necesarios, tanto de hardware y software para cumplir con el diseño y programación. (Lang, Lescisin and Mahmoud, 2018)

El término tarjeta de desarrollo es ambiguo y comúnmente es confundido con términos como microcontrolador, sistema embebido o computadora de placa simple. El microcontrolador no debería ser confundido con un microprocesador el cual es una unidad central de procesamiento (CPU) con la capacidad de comunicación con periféricos externos a través de buses de datos, mientras un microcontrolador contiene CPU, RAM, ROM, dispositivos de entrada y salida y es diseñado a menudo para propósitos específicos como el control y monitoreo de datos. (Lang, Lescisin and Mahmoud, 2018)

En los últimos años han sido diseñadas distintas tarjetas de desarrollo de hardware para cumplir diferentes requerimientos necesitados en la actualidad. (Raza *et al.*, 2016). Algunas características claves de estas tarjetas son:

- Múltiples pines para ser utilizados como GPIO, UART, I2C, SPI, etc.
- Construcción en ADC.
- Protocolos de comunicación múltiples.

- Capacidades de red como Bluetooth, Wi-Fi y Ethernet.
- Bajo poder de procesamiento.
- Fácil implementación y bajo mantenimiento.
- Soporte de múltiples sistemas operativos.
- Librerías para soporte de diferentes hardware.
- Diseño de Software y Hardware libre.
- Administración remota.



Figura 15-1. Tarjeta de desarrollo Raspberry Pi3

Fuente: (Lang, Lescisin and Mahmoud, 2018)

1.15 Telemetría

Usar un radio de telemetría es una forma fácil de configurar un enlace entre una controladora de vuelo y una estación de tierra. Es una plataforma de radio pequeña, liviana, económica y por lo general permite rangos de más de 300 m. (ArduPilot, 2016)

Dependiendo el país o la región los radios de telemetría pueden ser de 915 Mhz o 433 Mhz. Entre las características más importantes se encuentran:

- Disponibilidad den 900 Mhz o 433 Mhz
- Sensibilidad del receptor en -121 dBm
- Potencia de transmisión de hasta 20 dBm (100 mW)
- Tasa de transferencia en aire hasta 2050 kbps
- Enlace serial transparente

- Multiplexación por división de tiempo adaptativa
- Se puede usar como un amplificador bidireccional para un rango aún mayor



Figura 16-1. Módulos de telemetría
Fuente: (JJ HOBBIES, 2018)

1.16 Estación de control de tierra

La estación de control de tierra es una combinación de hardware y software simulando así la cabina de un avión real. El hardware podría ser un joystick o cualquier otro dispositivo electrónico con el cual el piloto toma el control del VANT. El software recopila los datos de telemetría del VANT mediante cualquier enlace de comunicación y muestra una interfaz de usuario en donde el piloto puede conocer el estado del mismo como la ubicación GPS, altitud, rumbo, estado de la misión, etc. (Haque, Kormokar and Zaman, 2017)



Figura 17-1. Estación de Control de Tierra
Fuente: (Unmanned Systems Technology, 2018)

1.16.1 *Software de estación de control de tierra*

El software de estación de control de tierra es una interfaz de usuario donde el piloto del VANT, podrá visualizar parámetros de control y datos de telemetría de la aeronave. El software permanece vinculado directamente con el módulo de telemetría comunicándose con el drone.

El software presenta los datos de telemetría procedente de drone como la localización GPS, altitud, velocidad vertical, velocidad horizontal, rumbo, balanceo, cabeceo, guiñada, modo de vuelo, etc. en una sola interfaz, en donde se define el estado actual y la condición física de los drones. (Haque, Kormokar and Zaman, 2017)

El software también contiene varias configuraciones para modificar la calibración del sensor IMU del VANT, magnetómetro, de la radio, modos de vuelo, etc.



Figura 18-1. Software QGroundControl
Fuente: (Dronecode, 2018)

1.16.2 *MAVLink*

MAVLink es un protocolo de comunicación originalmente para MAV (Micro Aerial Vehicles), pero actualmente a llegado a todo tipo de vehículos no tripulados aéreos y terrestres. (Erle Robotics, 2016)

Este protocolo envía una secuencia de bytes codificados los cuales son enviados por un transductor a través de diferentes medios como serie USB, radio frecuencia, Wi-Fi, GPRS, etc.

Gracias a la codificación se ordena la información en una estructura de datos añadiendo checksum, un número de secuencia y son enviados a través del canal byte a byte. (Erle Robotics, 2016)

1.17 Sistema operativo robótico

El sistema operativo robótico más conocido como ROS es un sistema meta – operativo de código abierto para robots. Proporciona los servicios esperados de un sistema operativo como la abstracción de hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidad de uso común. También proporciona herramientas y bibliotecas para obtener, crear, escribir y ejecutar código en varios equipos. (Open Source Robotics Foundation, 2018)

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Requerimientos del sistema

Una vez realizado el estudio más acorde al sistema de vuelo cooperativo para tareas de microfumigación y basados en el mismo, existe la posibilidad de definir los requerimientos, los cuales son:

- El sistema de vuelo de cooperativo debe estar integrado por dos VANTs como mínimo, pero puede ser escalable a 16.
- Debe existir una comunicación en todo momento entre los VANTs y la estación a tierra.
- El enlace de las comunicaciones debe tener un alcance de hasta 500 m.
- Visualizar datos importantes como altura, ángulos del vehículo aéreo, etc., en una interfaz humana máquina.
- El VANT debe ser capaz de realizar la microfumigación y además realizar misiones autónomas y trayectorias enviadas por el usuario.
- La alimentación eléctrica del sistema debe garantizar al menos 10 minutos de funcionamiento.
- Ser de fácil instalación, despliegue y operación.

2.2 Concepción general de la arquitectura del sistema

Una vez conocidos los requerimientos que debe tener el sistema de vuelo cooperativo, se procede a diseñar la arquitectura del mismo y en el Gráfico 2-1 se puede ver el diagrama de la misma.

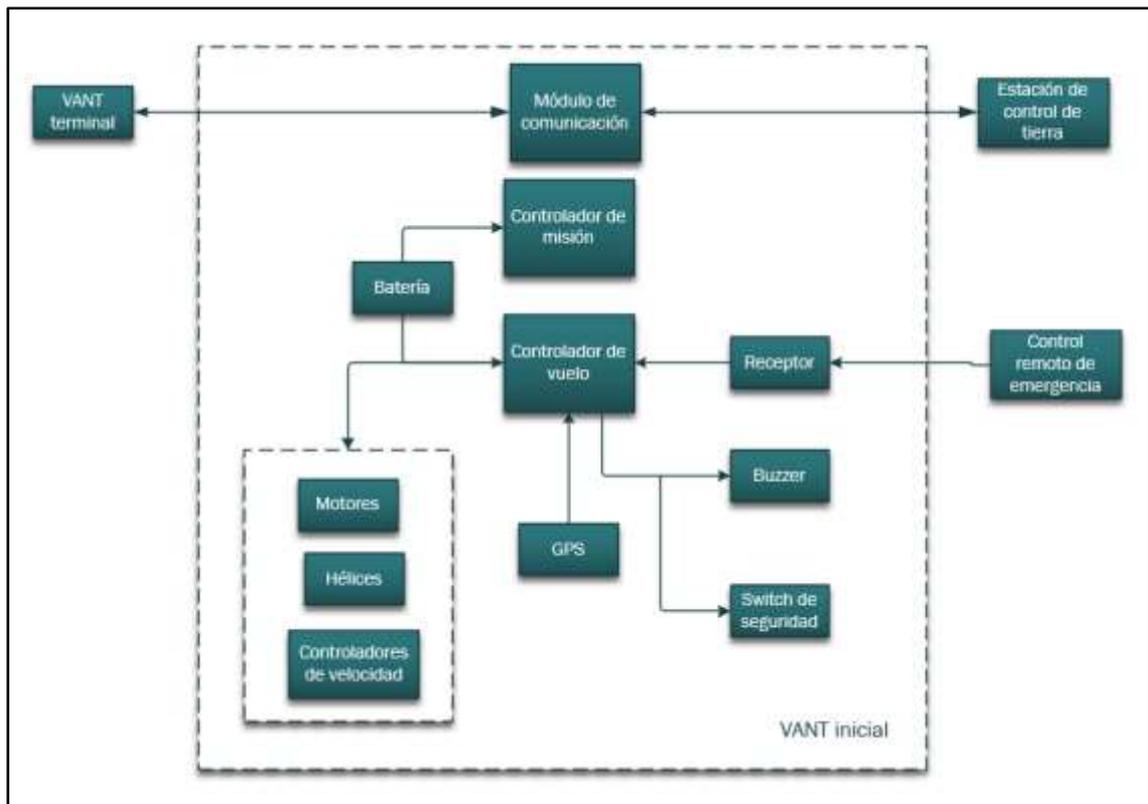


Gráfico 1-2. Arquitectura del sistema de vuelo cooperativo para microfumigación
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como es evidente en el Gráfico 2-1, para la respectiva implementación se utilizó dos VANT a los cuales se denominan inicial y terminal respectivamente y los mismos toman un papel muy importante para el vuelo cooperativo y la retransmisión de las comunicaciones.

Es importante detallar el funcionamiento de los VANTs dentro de la arquitectura implementada.

2.3 Diseño de la arquitectura de los módulos del sistema

2.3.1 VANT inicial

Este VANT se encarga de la retransmisión de las comunicaciones para la realización del vuelo cooperativo. Se puede comunicar con el VANT terminal y con la estación de control a tierra.

Está compuesto por los siguientes componentes:

- Controlador de vuelo
- Tarjeta de desarrollo de hardware

- Módulos de comunicación
- Motores, hélices, controladores de velocidad
- Batería
- GPS
- Receptor de radio control

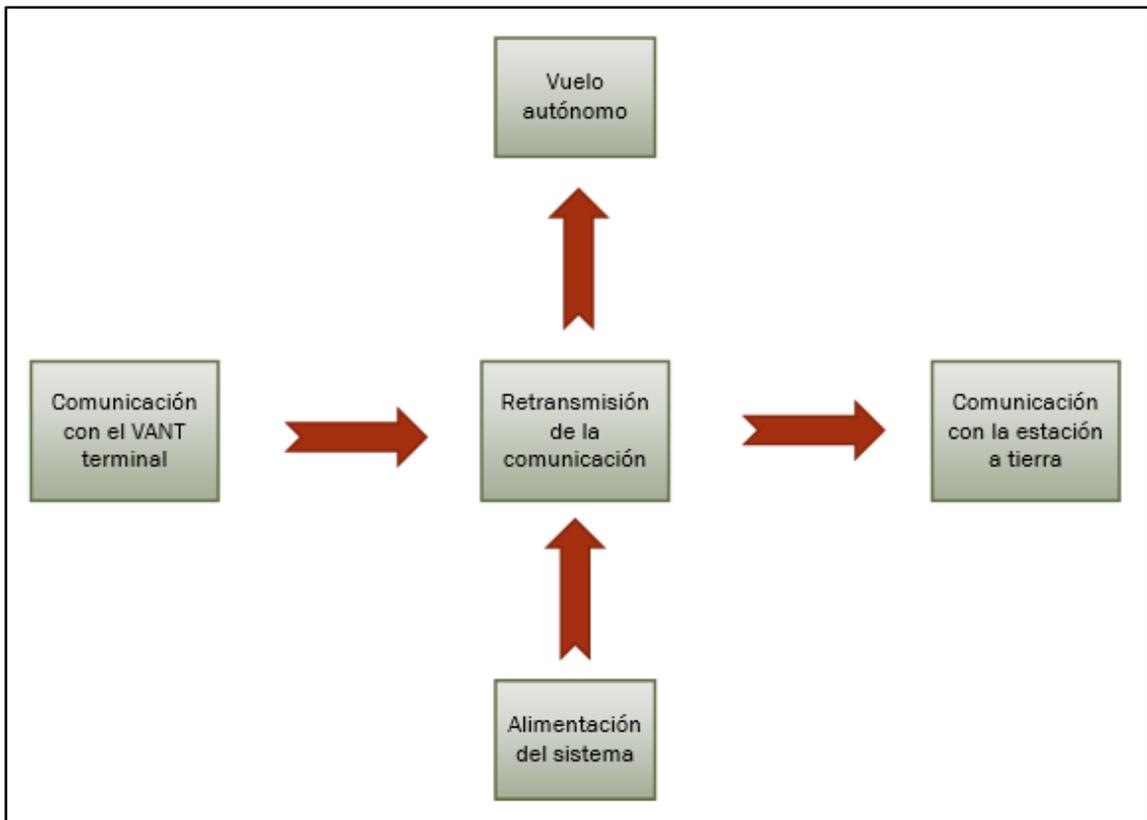


Gráfico 2-2. Diagrama de bloques del VANT inicial
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.3.2 VANT terminal

Este VANT se comunica con la estación de control a tierra gracias a la retransmisión de comunicación, realizado por el VANT inicial.

Está compuesto por los siguientes componentes:

- Controlador de vuelo
- Tarjeta de desarrollo de hardware
- Módulos de comunicación
- Motores, hélices, controladores de velocidad

- Batería
- GPS
- Receptor de radio control

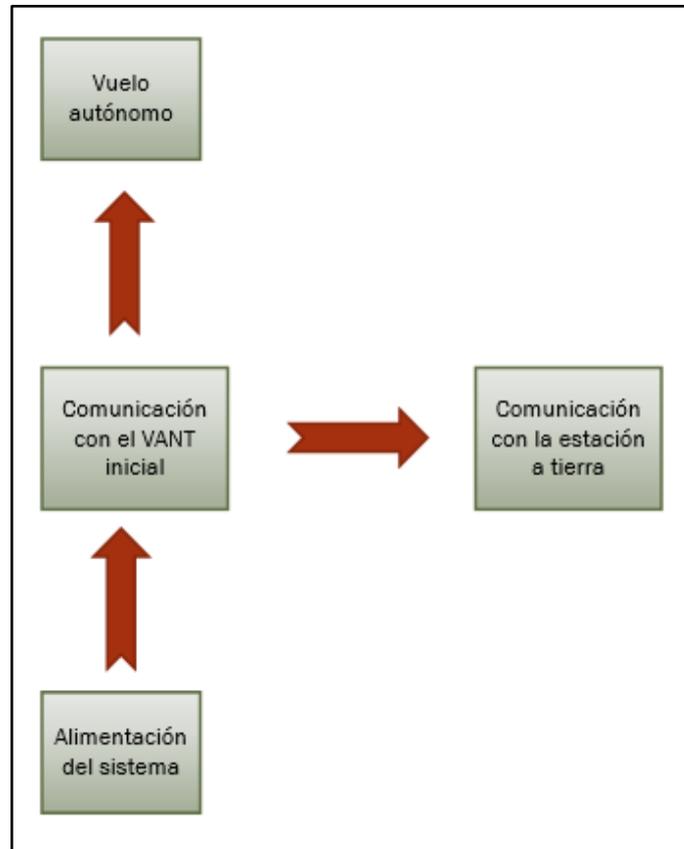


Gráfico 3-2. Diagrama de bloques del VANT terminal
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4 Selección de componentes del sistema

Teniendo en cuenta los requerimientos se puede hacer una correcta y minuciosa selección de los componentes de los VANTs a implementar. Con esto se evita errores en el diseño y en el sobre dimensionamiento de componentes, ahorrando así en costo y tiempo.

Uno de los criterios de selección utilizados fue la comparación de dispositivos con características similares y utilizados en experimentos científicos evidenciados en artículos de investigación de alto nivel.

2.4.1 Pixhawk 2.4.8

El controlador de vuelo Pixhawk es un proyecto de hardware libre, el cual tiene como principal objetivo el de proveer una plataforma de hardware para la investigación académica, el entretenimiento y el uso industriales manteniendo un bajo costo y brindando altas prestaciones y disponibilidad. El proyecto DroneCode utiliza a este controlador en la parte de hardware.

Posee varios algoritmos para en el control de posición, altitud, navegación y manejo para diferentes configuraciones de VANTs como los de ala fija, multirrotores y rovers. El software encargado del controlador es Dronecode, lo cual permite la conexión de diferentes sensores, módulos de telemetría y otros accesorios.

Una de las ventajas de este controlador de vuelo es la conexión por medio de telemetría a laptops o Smartphones, brindando así un control completo y muy avanzado a un costo muy bajo.

Entre sus características más importantes se encuentran:

- 14 salidas PWM
- 5 puertos UART
- Comunicación I2C
- Puerto micro USB
- Puerto para tarjeta micro SD para grabar datos de vuelo
- Entradas de 3.3 V y 6.6 V dc
- Señal PPM
- Salidas protegidas contra sobre voltaje
- Giroscopio de 3 ejes
- Acelerómetro de 3 ejes
- Magnetómetro (brújula)
- Acelerómetro de 6 ejes (brújula)
- Barómetro de alta precisión
- Procesador de 32 bits, 2 MB de memoria flash
- Frecuencia del reloj de 168 MHz
- Corriente: 50 mA

- Tamaño: 81.5 x 50 x 15.5 mm
- Peso: 38 g

Se selecciona este controlador de vuelo por su fácil configuración y prestaciones muy útiles para el sistema de vuelo cooperativo a ser implementado. Este hardware se encargará de todo el control de los motores, altitud, posición, etc. Además, brinda al usuario la posibilidad de realizar vuelos autónomos guiados por GPS lo cual es muy importante en la microfumigación.



Figura 1-2. Controladora de vuelo Pixhawk 2.4.8
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4.2 Raspberry Pi 3 Model B

La Raspberry Pi 3 Model B es una tarjeta de desarrollo hardware, cuyo principal objetivo según sus creadores era el de estimular el aprendizaje y enseñanza de la informática en las escuelas. Actualmente es muy conocida y tiene muchas aplicaciones como el de un centro de entretenimiento, mini computadora o como plataforma de hardware para proyectos de investigación.

El software utilizado es de código abierto y utiliza por lo general una versión de GNU/Linux, pero debido a su versatilidad diferentes sistemas operativos pueden ser utilizados como una versión del Windows 10.

Entre sus principales características se encuentra:

- Procesador de 64 bits Broadcom BCM2837
- Frecuencia del reloj de 1.2 GHz
- 1 Gb de memoria RAM
- Wifi 802.11 b/g/n y bluetooth 4.1 integrados
- 1 puerto fast ethernet
- 4 puertos USB 2.0
- GPIO de 40 pines
- Puerto HDMI
- Voltaje de alimentación de 5 V dc
- Puerto para memoria micro SD
- Corriente: 230 mA
- Peso: 45 g

Se escoge esta tarjeta de desarrollo de hardware por su fácil programación y alta disponibilidad para adaptarse a diferentes proyectos, además, existen varios repositorios con librerías de acceso libre las cuales facilitarían la implementación del sistema de vuelo cooperativo. Se encargará de gestionar el sistema de retransmisión para la formación de un enlace permanente de comunicación entre los VANTs y la estación a tierra.



Figura 2-2. Tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 Model B
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4.3 Módulo de telemetría 3DR Radio 915 MHz

Una de las formas más fáciles para enlazar un VANT y una estación de control de tierra el uso de módulos de telemetría, por ser de bajo costo, pequeños y fáciles de usar. 3DR Radio para la fabricación de sus módulos utiliza firmware de código abierto lo cual da al usuario una gran posibilidad de usos y aplicaciones a diferencia de otros con los cuales no se podría.

Respecto a las frecuencias la de 433 y 915 MHz son las más usadas y permitidas a nivel mundial, por no interferir con otros sistemas de comunicación.

Aunque existen otros canales para enviar la información desde la estación de control de tierra al VANT como el Wi-Fi IEEE 802.n o la red móvil 3G / 4G – LTE, se escogió la telemetría de 915 MHz por los siguientes motivos:

Tabla 1-2. Comparación de diferentes tecnologías inalámbricas.

Tecnología	Ventaja	Desventaja
Wi-Fi IEEE 802.n	Conexión fiable de alta velocidad.	Alcance efectivo de menos de 100 m.

Red móvil 3G / 4G LTE	Muy útil en aéreas metropolitanas y urbanas.	Depende de la potencia de la señal y en áreas remotas por lo general no está disponible.
Telemetría 915 MHz	Alcance de varios km, no se necesita arquitectura de soporte.	El alcance puede verse afectado por la presencia de obstáculos.

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Por lo expuesto en la Tabla 1-2, se escogieron los módulos de telemetría de 915 MHz para la comunicación entre los VANTs y la estación de tierra, los cuales presentan las siguientes ventajas:

- Sensibilidad del receptor de -121 dBm
- Potencia de transmisión de 20 dBm (100 MW)
- Uso de protocolo MAVLink
- Multiplexor por división de tiempo (TDM)
- Espectro expandido de salto de frecuencia (FHSS)
- Salto de frecuencia configurable por el usuario
- Posibilidad de uso como amplificador bidireccional
- Corriente: 25 mA
- Peso: 15 g

Los módulos de telemetría en el prototipo del sistema de vuelo cooperativo, tendrán la función de proveer un enlace confiable de comunicaciones entre la estación de tierra y los VANTs, para el cumplimiento de las misiones autónomas enviadas por el usuario.

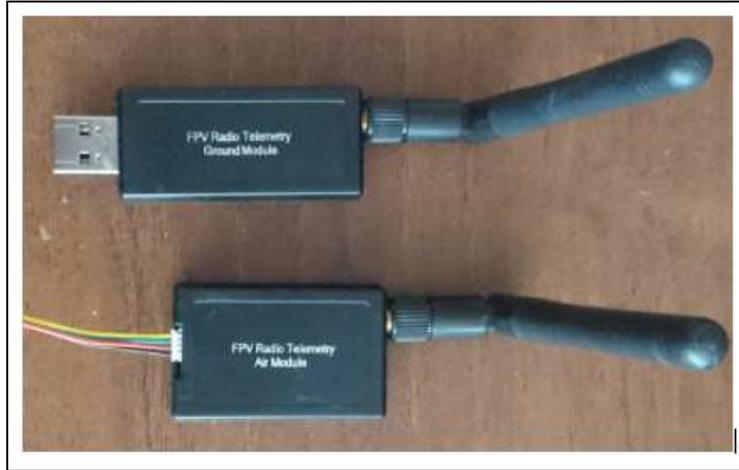


Figura 3-2. Módulo de telemetría 3DR Radio 915 MHz
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4.4 Transmisor RC FlySky Fs-i6X

El transmisor RC FlySky Fs-i6X, es muy apreciado por las personas aficionados al aeromodelismo, por sus características, prestaciones y fácil uso para el control de diferentes aparatos radio controlados.

Es útil por ofrecer protección contra interferencias con un bajo consumo de energía más bajo y con alta sensibilidad. Posee la capacidad de la recepción de datos de temperatura, altitud y la señal de cualquier otro sensor, además de dar soporte i-BUS. A lo concerniente con la identificación, cada transmisor se enlaza con el receptor comunicándose solo entre si y evitando la interferencia con otros sistemas.

Entre sus principales características y especificaciones están:

- Rango de RF: 2.408 – 2.475 GHz
- Potencia de RF: <20 dBm
- Peso: 392 g
- Canales: 10 PWM, 8 PPM, 18 i-BUS
- Voltaje: 4 – 6.5 V
- Útil para: avión, planeador, helicóptero, drone

- Corriente receptor: 25 mA
- Peso receptor: 10 g

Se eligió el presente transmisor, por ser compatible con receptores de hasta diez canales y el protocolo de comunicación PPM, el cual también utiliza el controlador de vuelo Pixhawk, haciendo así más fácil la conexión y configuración.



Figura 4-2. Transmisor y receptor RC FlySky Fs-i6x
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4.5 Módulo GPS Ublox Neo M8N

El módulo GPS de la serie NEO-M8, basa su funcionamiento en el buen rendimiento de otras series como como la GNSS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS. Ha demostrado alta sensibilidad y tiempos mínimos en la adquisición de datos, mantiene un bajo consumo de potencia del sistema. Posee un gran nivel de robustez combinado con la capacidad para integrarse con opciones flexibles de conectividad.

La utilización de este módulo es útil por la ubicación de brújula, la cual está lejos de fuentes de interferencia presente en el VANT, además posee batería de reserva para arranques en caliente y viene pre configurado para el uso con el controlador de vuelo Pixhawk.

Entre sus características y especificaciones más importantes están:

- Sensibilidad de navegación de -167 dBm
- Velocidad de actualización de hasta de 10 Hz
- Batería de litio de reserva de 3V
- Regulador de voltaje de 3.3 V
- Estuche protector
- Peso: 32 g
- Diámetro: 60 mm
- Corriente: 25 mA

Se eligió este módulo GPS, por su fácil configuración e integración con el controlador de vuelo antes escogido y además por su alta confiabilidad en la navegación y el seguimiento de trayectorias para la realización de vuelos autónomos.



Figura 5-2. Módulo GPS Ublox Neo M8N
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4.6 Frame F450

Este tipo de frame es muy utilizado por los aficionados a los VANT, tiene un tamaño lo cual lo hace útil para diferentes aplicaciones como fotografía, supervisión de eventos o para microfumigación. Sus dimensiones son iguales a los frames utilizados por modelos comerciales como el DJI Phantom 2 y 3.

Para ahorra tiempo en el ensamblaje, posee una placa pcb con un circuito integrado para proveer la alimentación eléctrica a todos los componentes y por su diseño se tiene gran espacio para instalar diferentes controladores de vuelo y sus accesorios, Además, es fabricado con materiales de alta calidad lo cual lo hace resistente a choques y caídas durante el vuelo.

Entre sus principales características se encuentran:

- Peso: 322 g
- Hélices recomendadas: 10 x 4.5
- Batería recomendada: 3S – 11.1 V – 1500 – 5000 maH
- Motores recomendados: 2212 / 920 KV
- Esc recomendado: 15 – 30 A

Se escoge este frame por la versatilidad presentada, para ser utilizado en diferentes aplicaciones, en este caso para la microfumigación, además, es fácil hallarlo en el mercado y de igual manera los componentes para el cual fue diseñado. El tamaño es útil para colocar el controlador de vuelo y la tarjeta de desarrollo, los cuales son una parte fundamental para el sistema de vuelo cooperativo.



Figura 6-2. Frame F450
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4.7 Motor brushless 2212 / 920 KV

Este tipo de motores son los más útiles y utilizados en VANT gracias a las características y prestaciones halladas en los mismos. A diferencia de los motores eléctricos tradicionales, estos no poseen escobillas lo cual los hace muy eficientes y les da una vida útil más larga.

Su diseño permite tener un rendimiento más estable y un desmontaje más conveniente, gracias al nuevo tipo de impulsor. Puede soportar hasta 15000 revoluciones al utilizar rodamientos de acero inoxidable para el eje. Puede girar de manera estabilizada produciendo el menor ruido.

Entre sus características y especificaciones más importantes se encuentran:

- RPM: 15000 máx.
- Diámetro; 28 mm
- Rotación: CCW y CW
- KV: 920
- Peso: 56 g
- Corriente: 12 A máx.
- Batería recomendada: 2S – 3S

Se escogieron este tipo de motores, porque son los más adecuados para el frame seleccionado, además por las características de estabilidad y de bajo ruidos para así evitar cualquier posible interferencia en el sistema.



Figura 7-2. Motor brushless 2212 / 920 KV
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4.8 ESC BLHeli 30 A

Controlador electrónico de velocidad o ESC (electronic speed controller) por sus siglas en inglés, es el encargado de la regulación de velocidad para motores brushless. Son utilizados en todos los VANT en donde se utilicen motores sin escobillas.

Está diseñado para proporcionar un rendimiento superior en multirrotores, una respuesta suave del acelerador y una operación silenciosa. El pequeño tamaño con combinado con bajo peso lo hace de fácil instalación. Su código permite funciones para evitar la pérdida de sincronización.

Entre sus características y especificaciones más importantes están:

- Corriente continua: 30 A
- Batería recomendada: 3S – 6S

- Peso: 7 g
- Protocolos soportados: Oneshot125 (125-250us), Oneshot42 (41.7-83.3us) y Multishot (5-25us)
- Corriente de consumo: 50 mA

Se escoge este tipo de ESC principalmente porque ejecuta el firmware BLHeli, el cual soporta diferentes protocolos para proporcionar una aceleración y desaceleración casi inmediatas, lo cual es una parte fundamental para el sistema de vuelo cooperativo y la realización de vuelos autónomos a diferentes velocidades.



Figura 8-2. ESC BLHeli 30 A
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.4.9 Bateria LiPo 3S 50C 5000 mAh

En un VANT la batería LiPo, es la encargada de proveer toda la energía eléctrica al sistema. Está formada de litio y polímero lo cual proporciona grandes cantidades de corriente de acuerdo a la demanda del sistema.

La batería escogida ofrece un gran poder y largo tiempo de uso, además, ha sido diseñada y probada bajo los más altos estándares. Tiene una vida útil de 150 ciclos de recarga como mínimo.

Sus características y especificaciones más importantes se describen a continuación:

- Número de celdas: 3

- Tasa de descarga: 50c
- Capacidad: 5000 mAh
- Peso: 381 g
- Conector deans y XT60

Esta batería es escogida por la capacidad presentada y la tasa de descarga la cual es muy buena para la aplicación escogida la cual en este caso es el vuelo de un VANT aplicado a la microfumigación. Además, la mayoría de componentes escogidos son compatibles con el número de celdas de la batería.



Figura 9-2. Batería LiPo 3S 50C 5000 mAh
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Respecto al tiempo de vuelo a realizar por el VANT, es necesario calcularlo teniendo en cuenta la capacidad de la batería y el consumo de corriente de todo el sistema. En la tabla 2-2 se muestra el consumo de todos los elementos.

Tabla 2-2. Consumo de corriente de los elementos del VANT

Elemento	Corriente
Controlador de vuelo Pixhawk	50 mA
Tarjeta de desarrollo Raspberry	230 mA
Módulo de telemetría	25 mA
Receptor radio RC	25 mA
GPS	25 mA
Motores	24 A

ESC	200 mA
Total	24.55 A

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Con el dato de corriente total consumida por el sistema se procede a realizar el cálculo para encontrar el tiempo de vuelo. Como datos se tiene la capacidad de la batería de 5000 mAh y la corriente total de 24.55 A.

$$\frac{\text{Capacidad de la batería}}{\text{Corriente del sistema}} = \text{tiempo en h} \quad \text{Ecu. 2.1}$$

$$\frac{5 \text{ A/h}}{24.55 \text{ A}} = 0.2 \text{ h} \quad \text{Ecu. 2.2}$$

La respuesta de Ecu. 2.2 está dada en horas y realizando la conversión respectiva se tiene:

$$0.2 \text{ h} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 12.22 \text{ min} \quad \text{Ecu. 2.3}$$

Como se puede ver en Ecu. 2.3, la batería por sus características, ofrece un tiempo de vuelo de 12.22 minutos, cumpliendo así el requerimiento de alimentación eléctrica en donde al menos se debía garantizar 10 minutos de vuelo.

2.4.10 Hélices 10 x 4.5

Las hélices en un VANT son los mecanismos responsables de la propulsión, por la capacidad de conversión de la potencia del motor a fuerzas de empuje, para realizar el vuelo.

Deben ser de un material resistente como fibra de carbono o plástico ABS de alta calidad, y con diseños para girar en sentido horario (CW) y anti horario (CCW), para mover el aire debajo del VANT y este se eleve.

Si las hélices escogidas están mal colocadas se pueden producir varios problemas como los siguientes:

- El VANT no se eleva.
- Se eleva la punta, pero no se produce el despegue.
- Se mueve hacia adelante o atrás, pero no se eleva ni despega.

Respecto a las hélices escogidas presentan las siguientes características:

- Material: plástico ABS de alta calidad
- Diámetro: 10 pulgadas
- Paso: 4.5
- Peso: 10 g
- RPM.: 8535
- Velocidad: 37.99 mph
- Empuje: 1335 g

El motivo principal para la elección de las hélices fue el diseño ya que son compatibles con el modelo de frame y motores escogidos y proporcionan alta fiabilidad para el vuelo, además de proporcionar los modelos CW y CCW para evitar problemas al momento del despegue y la elevación.



Figura 10-2. Hélices 10 x 4.5 CW y CCW
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Con las características de las hélices ya claras, es importante definir la fuerza de empuje proporcionada por cada hélice, todo esto a miras, de cuanta carga útil puede transportar el VANT para las tareas de microfumigación.

Teniendo como datos las RPM y la velocidad es necesario calcular el empuje del VANT cuando el motor gire a 10000 RPM siendo la velocidad al momento de despegue y transportando la carga útil para la microfumigación.

$$empuje\ deseado = \left(\frac{RPM\ 2}{RPM\ 1}\right)^2 * empuje \quad Ecu. 2.4$$

Sustituyendo los datos se obtiene:

$$empuje\ deseado = \left(\frac{10000}{8535}\right)^2 * 1335 \quad Ecu. 2.5$$

$$empuje\ deseado = 1832.5\ g \quad Ecu. 2.6$$

Como se puede ver en el resultado de la Ecu. 2.6. cada hélice puede proporcionar un empuje de 1832.5 g cada una al momento del despegue cuando los motores giren a 10000 RPM. Con estos datos es importante conocer todos los pesos de los componentes para así saber cuánta carga útil se puede llevar para la microfumigación.

Tabla 3-2. Peso de los elementos del VANT

Elemento	Peso
Controlador de vuelo Pixhawk	38 g
Tarjeta de desarrollo Raspberry	45 g
Módulo de telemetría	15 g
Receptor radio RC	10 g
GPS	32 g
Motores	224 g
ESC	28 g
Frame	322 g
Batería	381 g
Hélices	40 g
Total	1135 g

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como se puede ver en la tabla 3-2, el peso total de todos los elementos es de 1135 g. El empuje de cada hélice es de 1832.5 g, cuando el motor gire a 10000 RPM, entonces el VANT puede llevar una carga útil de:

$$\text{Peso carga util} = \text{empuje helices} - \text{peso total} \quad \text{Ecu. 2.7}$$

$$\text{Peso carga util} = 7330 - 1135 \quad \text{Ecu. 2.8}$$

$$\text{Peso carga util} = 5595 \text{ g} \quad \text{Ecu. 2.9}$$

La respuesta de la Ecu. 2.9., expresa la carga útil a llevar la cual es de 5595 g, sin embargo, por motivos de seguridad y para no producir el llamado empuje en perdida se debe transportar 1/3 de este peso de carga útil quedando así:

$$\text{Carga util} = \frac{1}{3} * \text{peso carga util} \quad \text{Ecu. 2.10}$$

$$Carga\ util = \frac{1}{3} * 5595 \quad \text{Ecu. 2.11}$$

$$Carga\ util = 1865\ g \quad \text{Ecu. 2.12}$$

Entonces la carga útil para no producir el empuje en pérdida es de 1865 g, lo cual garantiza el cumplimiento de la microfumigación y con VANTs de pequeño tamaño, se puede realizar este tipo de tareas.

2.5 Esquema de conexiones del prototipo

Con los elementos necesarios para el prototipo, es necesario conocer las conexiones físicas de los mismos, para poder llevar a cabo el vuelo cooperativo. Las conexiones de los motores con los ESC, el controlador de vuelo con los diferentes elementos y la tarjeta de desarrollo con los módulos de telemetría son las conexiones más importantes a realizar.

2.5.1 Conexiones de los motores

Como se explicó anteriormente, en un VANT existen dos tipos de motores, los cuales giran en sentido de las agujas del reloj (CW) y al contrario de las agujas del reloj (CCW), por lo cual cada uno deberá tener su propia conexión con el respectivo ESC y de igual manera con las hélices.

Los motores brushless (sin escobillas) escogidos tienen tres bobinas, por lo cual se necesitará un cable para cada una, para inyectar una corriente para producir un campo magnético, produciendo así el movimiento giratorio.

El esquema de conexión de los motores con las hélices y el ESC, queda de la siguiente manera:

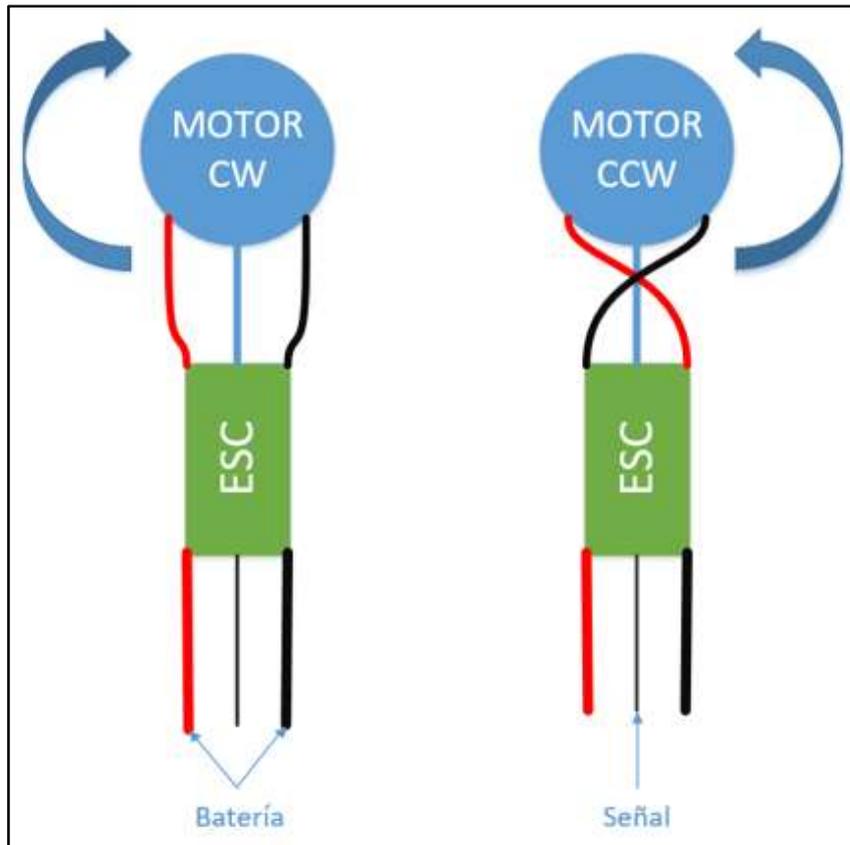


Gráfico 4-2. Esquema de conexiones con motores y ESC
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

De acuerdo al Gráfico 4.2, el motor CW se conecta directamente al ESC y para el motor CCW se intercambia la posición de dos cables con respecto al primer motor.

Respecto a las hélices, se puede encontrar las hélices de empuje (pusher propeller) las cuales se conectan al motor CW y hélices normales (normal propeller) conectadas al motor CCW como se puede ver en el Gráfico 5-2. Es importante colocar las hélices de manera correcta para producir un empuje vertical y donde el VANT no se vuelque o tenga dificultades en el despegue.

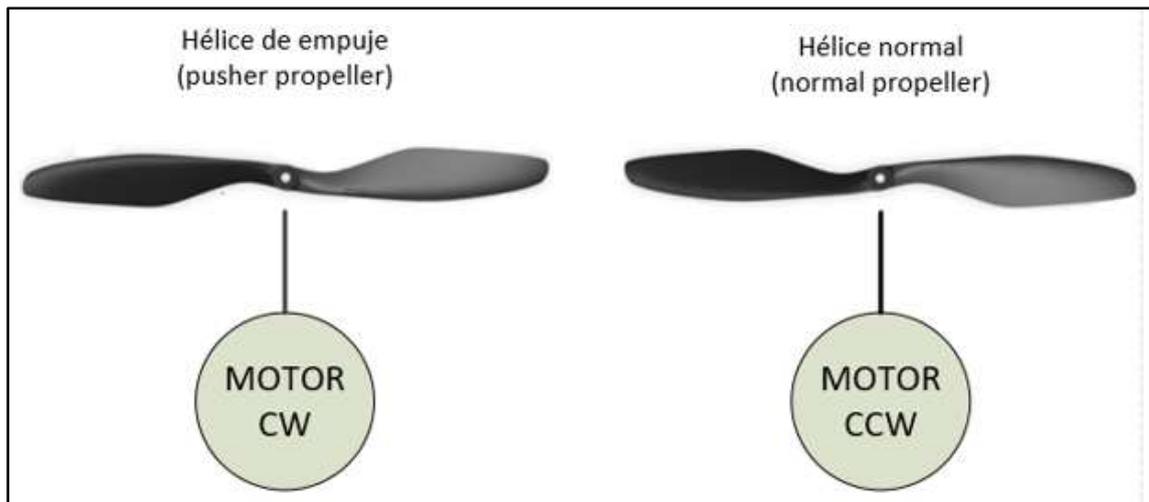


Gráfico 5-2. Correspondencia de las hélices con los motores
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.5.2 Conexiones del controlador de vuelo

En lo concerniente a la conexión del controlador de vuelo con sus elementos y accesorios, se detalla cómo deben ir conectados los ESC de cada motor, los elementos como el zumbador, switch de seguridad, GPS, regulador de voltaje y el puerto micro USB.

Los motores al colocarse sobre el frame toman un número del uno al cuatro dependiendo en la posición en donde se encuentren. De igual manera los pines machos del controlador de vuelo en donde se conectarán los cables de señal provenientes de los ESC, están numerados para así evitar conexiones incorrectas, evitando así el mal funcionamiento del prototipo. En el gráfico 6-2 y 7-2 se pueden ver más detalladamente estas conexiones.

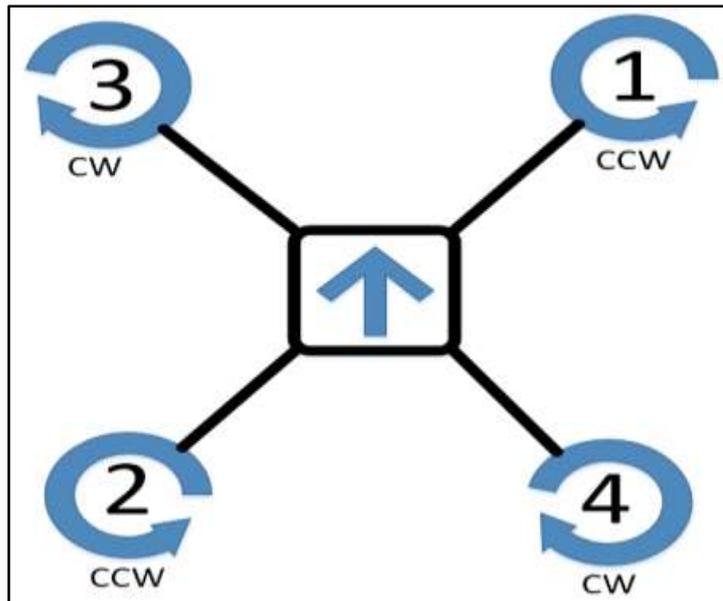


Gráfico 6-2. Posición de los motores en el frame
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como se puede ver en el gráfico 6-2 los motores CCW reciben la posición uno y dos, mientras los motores CW reciben la posición 3 y 4.

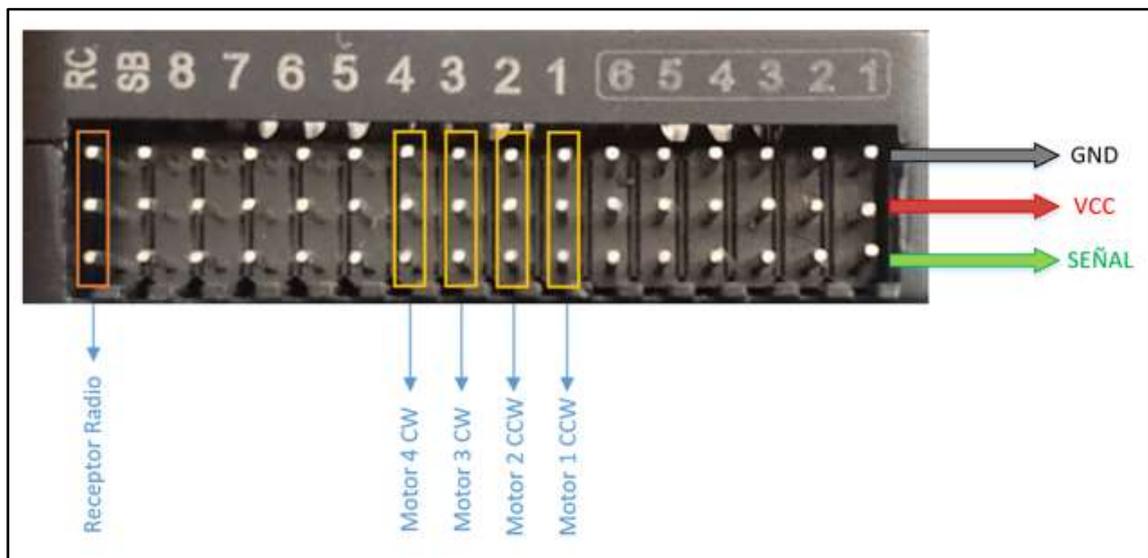


Gráfico 7-2. Conexión de motores y receptor de radio en el controlador de vuelo
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En el gráfico 7-2, se observa los pines machos del controlador de vuelo para realizar diferentes conexiones, la primera fila es GND, la segunda VCC y la tercera señal. Los motores deben conectarse según el número en la columna correspondiente y de igual manera el receptor de radio se conecta en la columna RC (radio control).

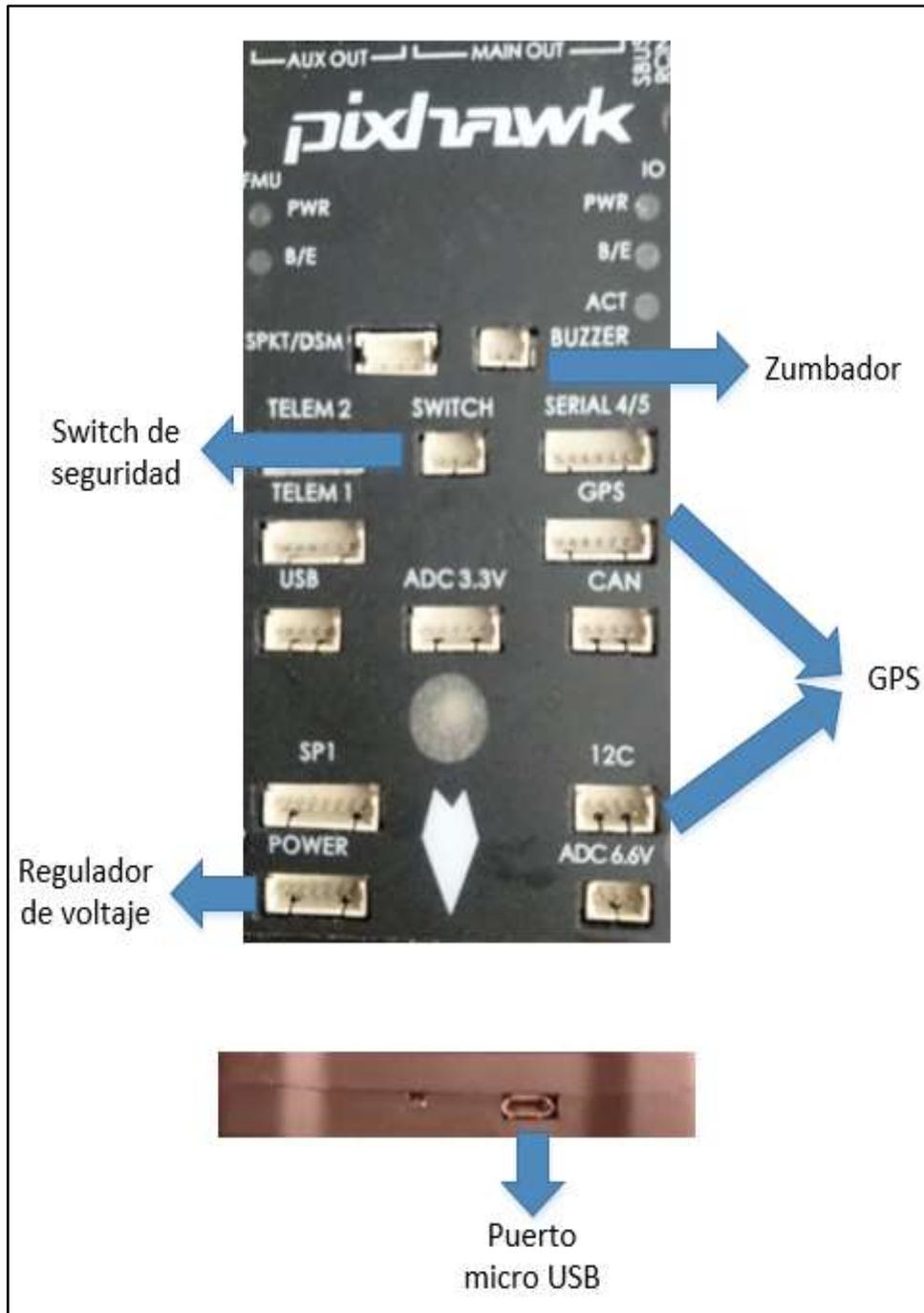


Gráfico 8-2. Conexión de elementos y accesorios en el controlador de vuelo
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

La conexión para los elementos y accesorios como el switch de seguridad, zumbador, regulador de voltaje y GPS, se pueden observar en el gráfico 8-2, en donde se indica el lugar para conectarlos. De igual manera a un costado del controlador de vuelo se observa en donde se puede conectar cualquier cable micro USB, para la programación y calibración del controlador de vuelo.

2.5.3 Conexión de la tarjeta de desarrollo

Las conexiones realizadas sobre la tarjeta de desarrollo son muy importantes, por la conexión de los módulos de telemetría los cuales son responsables de la retransmisión de información, para cumplir con las misiones para actividades de microfumigación.

Cada VANT, como se explicó anteriormente tiene asignado sus funciones y cada tarjeta de desarrollo tendrá conexiones similares, pero no iguales. El prototipo está conformado por dos drones, por lo cual tradicionalmente debería haber dos enlaces diferentes de telemetría, pero la dificultad presentada es la de utilizar dos softwares diferentes para tener un control multi VANT, entonces al desarrollar el sistema de retransmisión se unifican las telemetrías quedando de la siguiente manera.

Tabla 4-2. Instalación de los módulos de telemetría

Módulo telemetría 3DR	Conectado en
T1-1	Estación de control de tierra
T1-2	VANT inicial
T2-1	VANT inicial
T2-2	VANT terminal

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como se observa en la tabla 4-2, los módulos de telemetría encargados de la comunicación entre la estación de control de tierra y el VANT inicial fueron T1-1 y T1-2 y para la conexión entre el VANT inicial y el VANT terminal se utilizó T2-1 y T2-2.

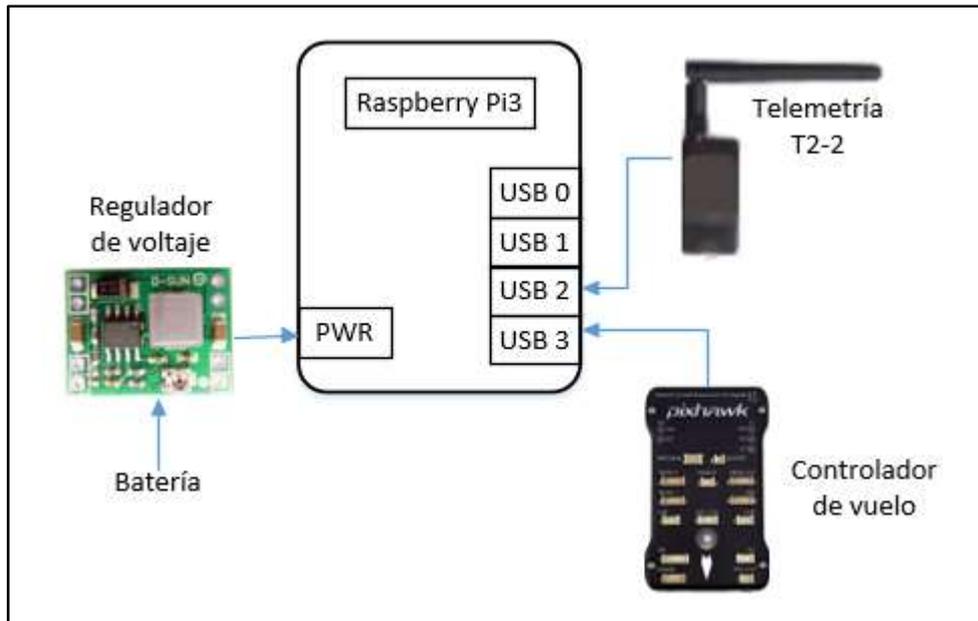


Gráfico 9-2. Conexión de la tarjeta de desarrollo del VANT terminal
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como se observa en el gráfico 9-2, única telemetría conectada en la tarjeta de desarrollo del VANT terminal es la T2-2, concordando con la tabla 4-2.

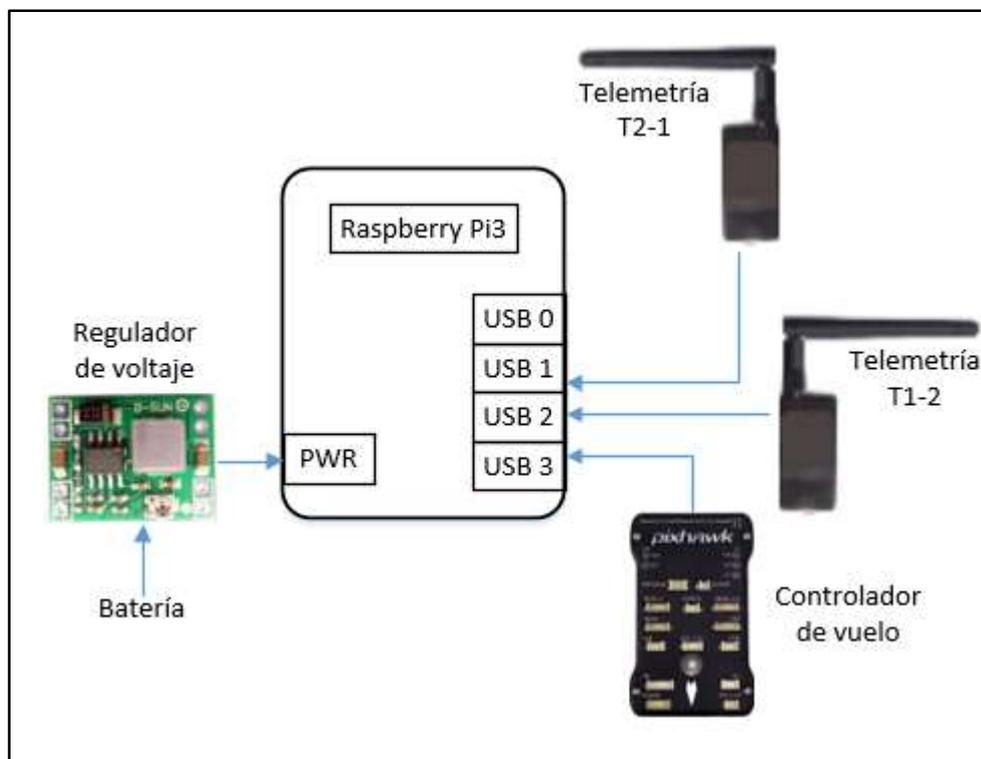


Gráfico 10-2. Conexión de la tarjeta de desarrollo del VANT inicial
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Para el VANT inicial las conexiones son similares a las del VANT terminal, la única diferencia es en la tarjeta desarrollo donde se aumenta una conexión más de una telemetría, concordando así con la tabla 4-2. En el gráfico 10-2 se pueden ver las conexiones necesarias.

2.5.4 Conexión del convertidor USB a UART

Los módulos de telemetría conectados directamente al controlador de vuelo por lo general no poseen puerto USB y se comunican con el protocolo UART. La necesidad de conexión de estos módulos a las tarjetas de desarrollo utilizadas hace necesario utilizar un módulo basado en el microchip CP102, para la conversión entre el protocolo USB y UART.

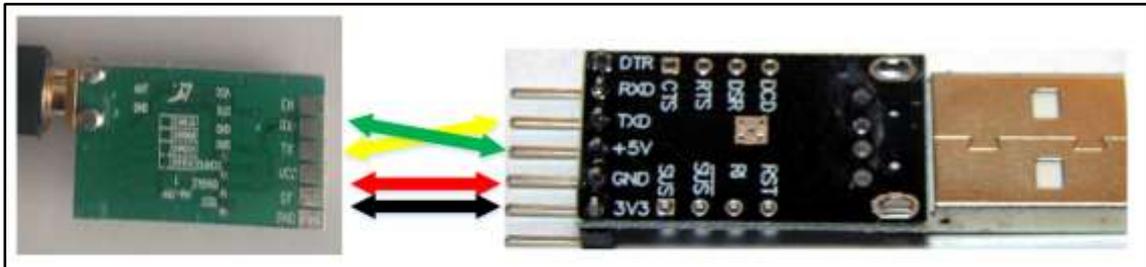


Gráfico 11-2. Conexión del módulo de telemetría y convertidor USB a UART

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como se observa en el gráfico 11-2, las conexiones de alimentación 5 voltios y tierra se conectan directamente, mientras los pines de comunicación TX y RX dependiendo del módulo de telemetría se conectan invertidos, para evitar errores en la comunicación.

2.6 Comunicación entre VANTs

Para hacer posible la comunicación entre VANTs, se consideró las telemetrías utilizadas, las cuales deberían formar un subsistema de comunicación y las mismas no deben producir interferencias en la radiofrecuencia. Para lograr esto se utiliza técnicas de multiplexación por división de tiempo (TDM) y espectro expandido de salto de frecuencia (FHSS).

2.6.1 Multiplexación por división de tiempo (TDM)

Las telemetrías Tn-1 y Tn-2 por defecto forman un enlace de comunicación entre sí, al momento del encendido los módulos buscan señales de sincronización, para sincronizar los relojes internos.

Cuando los relojes se encuentren sincronizados, se da inicio al proceso de TDM, en donde las telemetrías T_{n-1} y T_{n-2} , empiezan a transmitir datos de manera alternada y a recibir datos cuando no se esté transmitiendo. La alternancia se diseñó a una frecuencia fija y el tiempo transcurrido entre alternancias consecutivas se denominó tiempo de rotación.

La duración del tiempo de rotación debe ser fijada tomando en consideración, la duración debe ser lo suficientemente larga para transmitir mensajes por una sola ventana de transmisión, pero no tan extenso porque el otro módulo de telemetría esperaría más tiempo para la transmisión de sus propios mensajes, provocando retrasos de la información y la desincronización de las telemetrías.

El tiempo de rotación se estableció en 100 ms lo cual es muy adecuado para aplicaciones de retransmisión de comunicaciones brindando un funcionamiento estable.

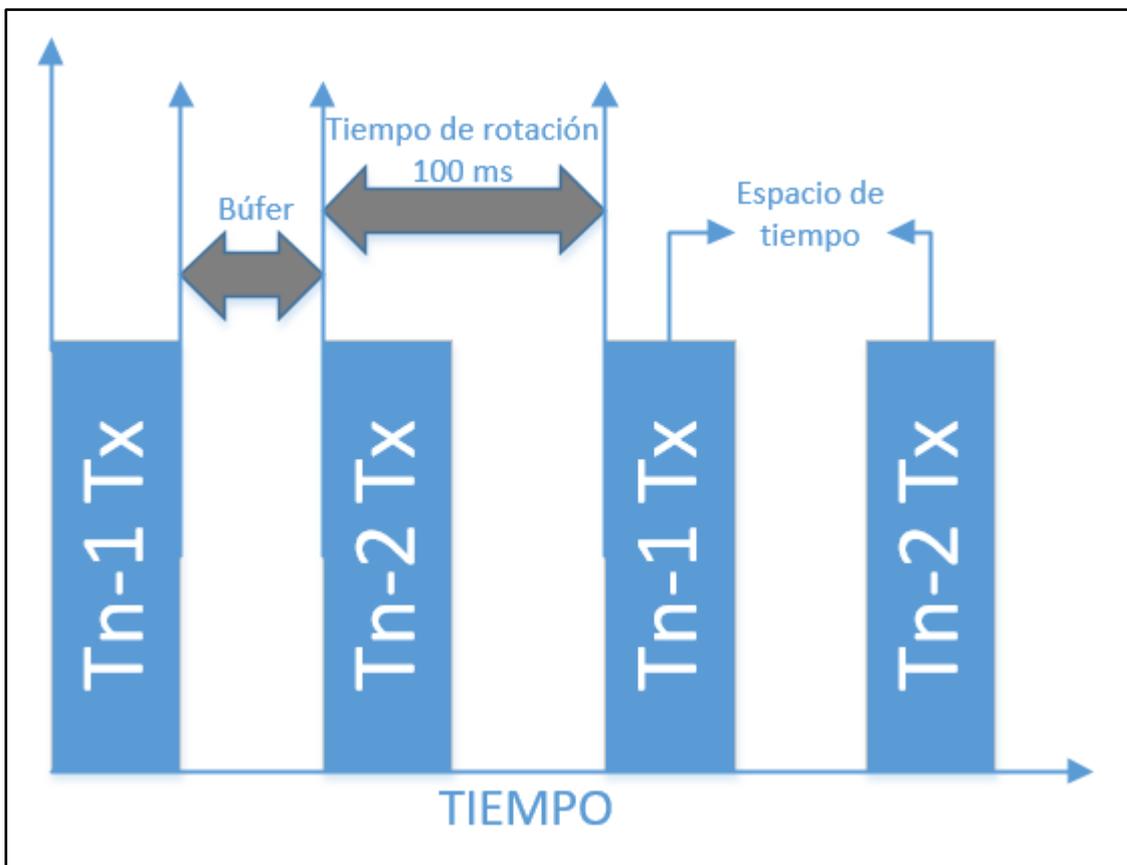


Gráfico 12-2. Principio de funcionamiento de la multiplexación por división de tiempo (TDM)
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Teniendo en cuenta el principio básico de funcionamiento de la multiplexación por división de tiempo como se puede ver en el gráfico 12-2, de manera sencilla el tiempo de rotación está dividido en dos espacios de tiempo, el uno usado para transmisión y el otro utilizado como un búfer para la recepción de datos.

Entonces conociendo el proceso TDM, se procede con la realización del diagrama de flujo con las consideraciones antes mencionadas, como se observa en el gráfico 13-2. Se comienza con la transmisión local del tiempo de rotación el cual si es receptado se sincroniza con el tiempo local para la transmisión de datos, cuando el espacio de tiempo para la transmisión se haya terminado se procede con la recepción y se sincroniza el tiempo local con el tiempo remoto, una vez haya finalizado el proceso, la transmisión de datos empieza de nuevo.

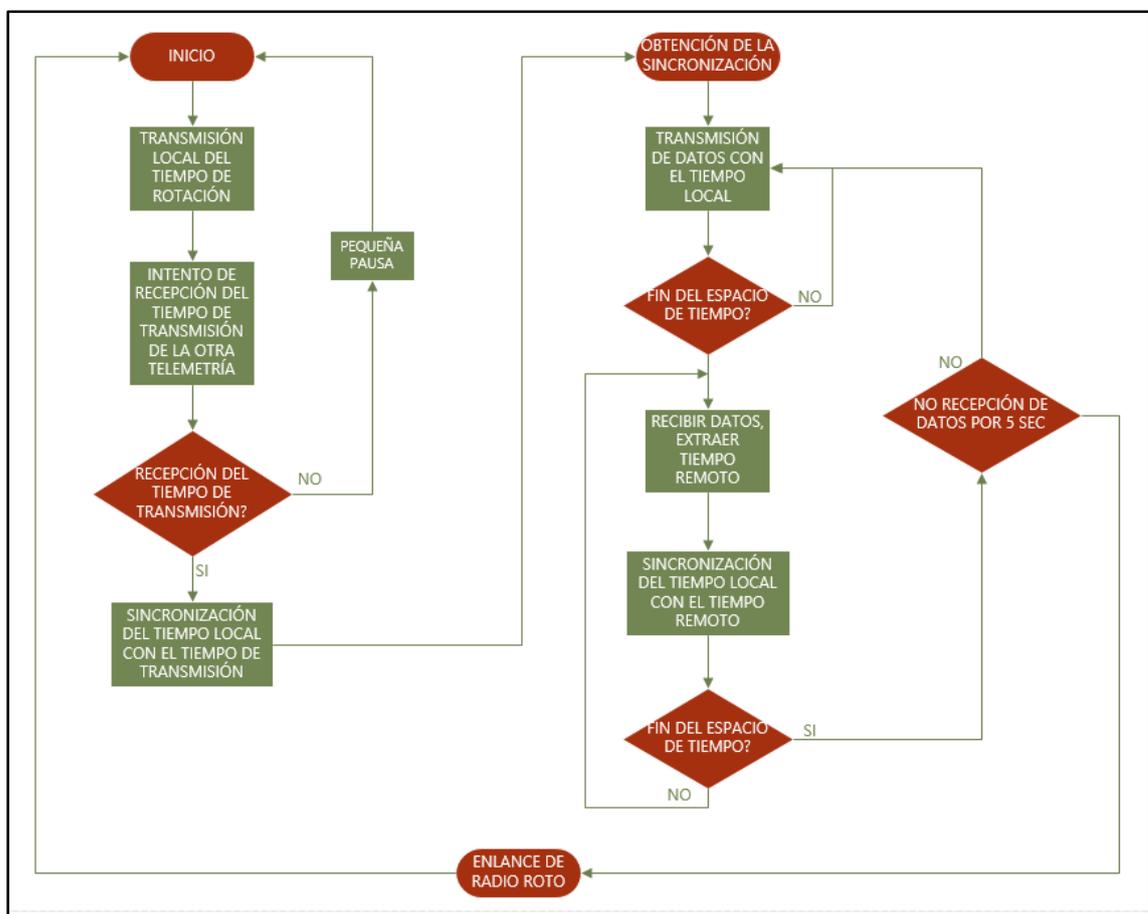


Gráfico 13-2. Diagrama de flujo de la multiplexación por división de tiempo (TDM)
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.6.2 Espectro expandido de salto de frecuencia (FHSS)

La banda de 915 MHz, se dividió en 50 partes iguales, generando así 50 subcanales para el salto de frecuencia de las telemetrías Tn-1 y Tn-2. Si aparece una nueva ventana de transmisión, Tn-1

y Tn-2 saltan a un nuevo subcanal, el cual se determina por secuencias de salto de canal aleatoria compartidas por ambas telemetrías.

En la tabla 5-2, se observa los saltos de frecuencia asignado a cada módulo de telemetría, T1-1 y T1-2 se configuraron con una secuencia de salto diferente a T2-1 y T2-2.

Tabla 5-2. Saltos de frecuencia de los módulos de telemetría

Módulo telemetría 3DR	Secuencia de saltos de frecuencia
T1-1	Secuencia de salto 1
T1-2	Secuencia de salto 1
T2-1	Secuencia de salto 2
T2-2	Secuencia de salto 2

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En el gráfico 14-2, se muestran los saltos de frecuencia de las telemetrías, aunque a pesar de la posibilidad de transmisión de ondas de radio de varios dispositivos al mismo tiempo, los subcanales de transmisión siempre son diferentes.

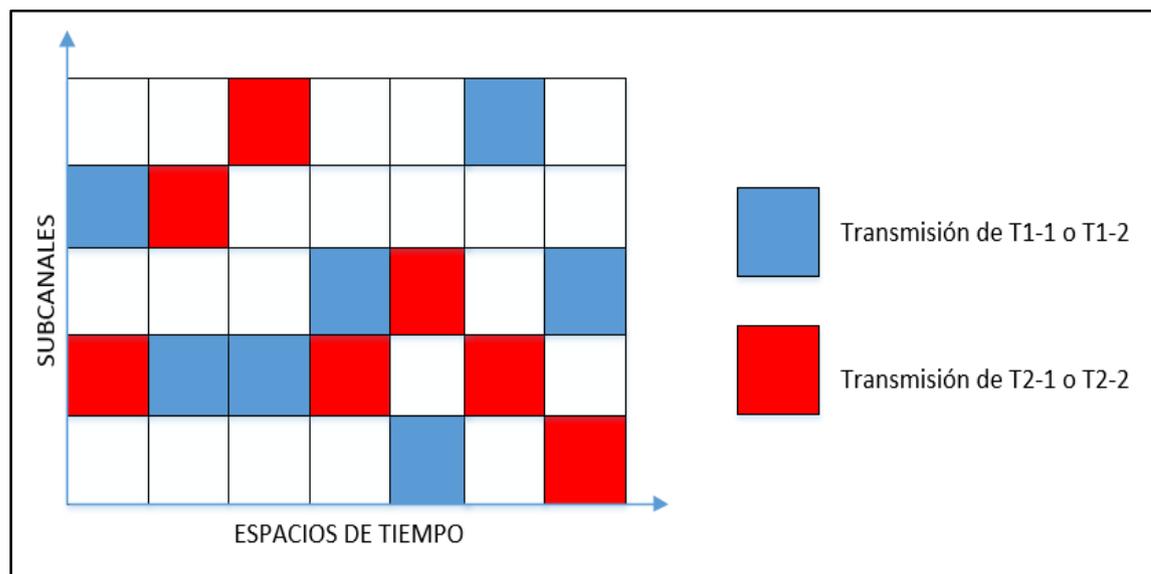


Gráfico 14-2. Salto de frecuencias de telemetrías

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.7 Desarrollo del software del prototipo de vuelo cooperativo

El desarrollo del software comprende del control de la misión y una HMI ejecutados en la estación de control de tierra. El control de misión es responsable de realizar un análisis del VANT objetivo y de los mensajes recibidos. Si el identificador (ID) del mensaje corresponde a otro VANT, el control de misión se encarga de enviarlo al destinatario y resolverá los datos para enviarlo al controlador de vuelo.

En la HMI, el principal objetivo a cumplir es el manejar adecuadamente el sistema de vuelo cooperativo, mostrando datos importantes de cada VANT, como la posición, modo de vuelo, altitud, etc.

2.7.1 Paquetes para retransmisión de comunicación

Para ayudar a la retransmisión de la comunicación, los datos y mensajes entre VANTs y la estación de control de tierra, se agruparon en paquetes. Para el prototipo de vuelo cooperativo los nodos comunicación son el VANT inicial, VANT terminal y la estación de control de tierra, los cuales recibieron un identificador (ID) único.

El paquete en su encabezado tenía dos campos un ID de origen y otro ID de objetivo. El ID de origen es de donde se transmite el paquete y el ID objetivo es el receptor del paquete. De esta manera se ayudó a la identificación del emisor y receptor de una trama de datos para el enrutamiento de tramas.

En el gráfico 15-2, se puede ver el formato de los paquetes.

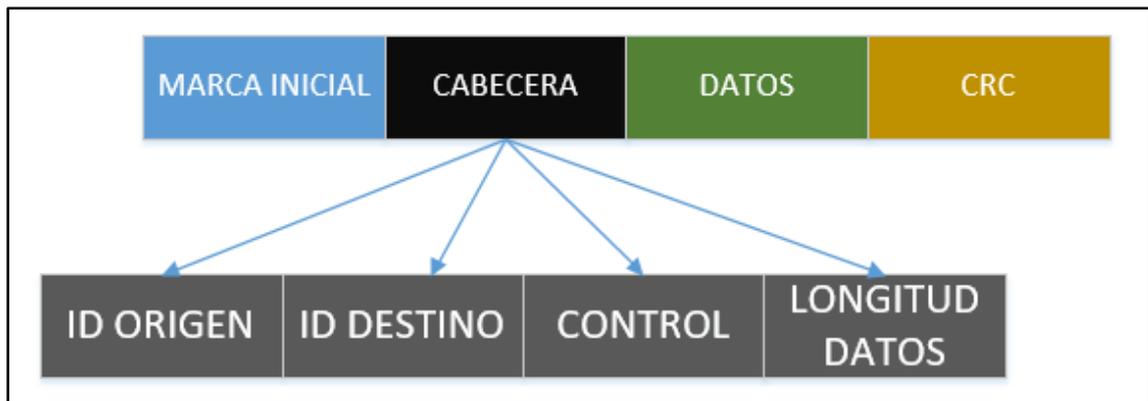


Gráfico 15-2. Formato del paquete de retransmisión
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la tabla 6-2 se detallan algunas direcciones usadas para el direccionamiento y envío de datos para el proceso de retransmisión.

Tabla 6-2. Tabla de direccionamiento del paquete de retransmisión

Segmento	Dirección	Descripción
Cabecera	0x01	ID GCS
Cabecera	0x02	ID VANT inicial
Cabecera	0x03	ID VANT terminal
Datos	Bit 0: 0x02	Cmd msg
Datos	Bit 1: 0x06	Cmd <ID> arm
Datos	Bit 1: 0x00	Cmd <ID> takeoff
Datos	Bit 1: 0x01	Cmd <ID> land
Datos	Bit 1: 0x02	Cmd <ID> goto
Datos	Bit 1: 0x05	Cmd <ID> RTL
Datos	Bit 1: 0x07	Cmd <ID> setmode
Datos	Bit 1: 0x08	Cmd <ID> gethome
Datos	Bit 1: 0x10	Cmd <ID> turn

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.7.2 Control de misión

El control de misión es ejecutado en la tarjeta de desarrollo de hardware la cual se encuentra a bordo del VANT. Tiene seis bloques, como se observa en el gráfico 16-2.

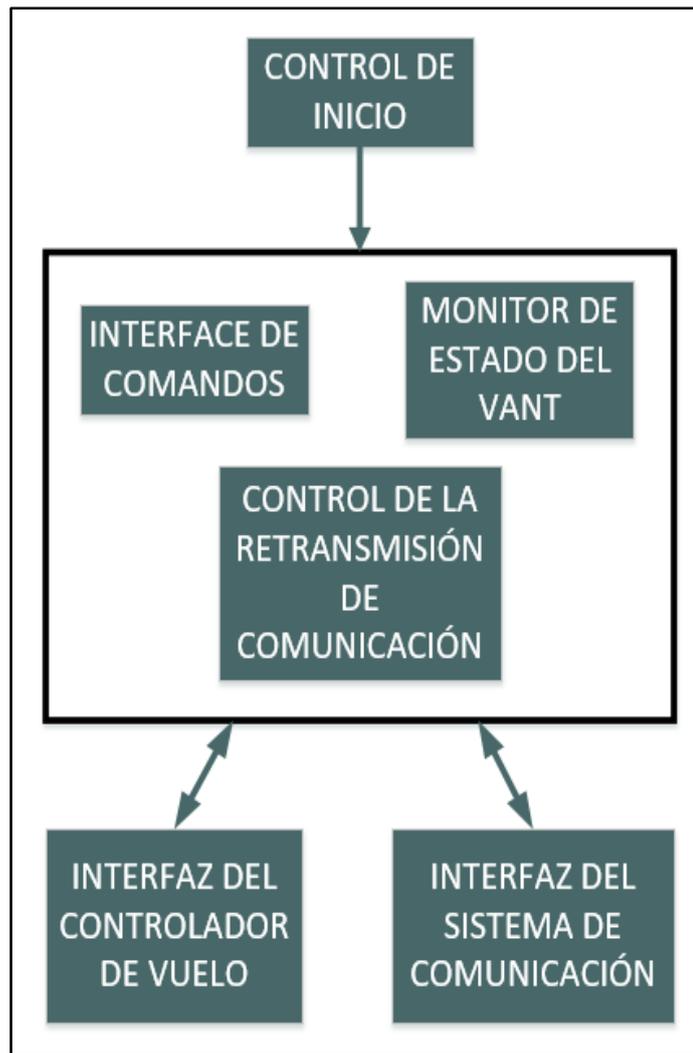


Gráfico 16-2. Diagrama de bloques del control de misión
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.7.2.1 Control de inicio

Se encarga de iniciar todo el sistema de control de misión al momento de encender el VANT.

2.7.2.2 Interface de comandos

Responsable de la traducción de los comandos enviados por el usuario en instrucciones de bajo nivel las cuales serán enviadas al controlador de vuelo, además registra e informa el estado de ejecución del comando.

2.7.2.3 Monitor de estado del VANT

Todos los parámetros de vuelo y de la misión realizada por el VANT, son monitoreados y reportados de manera regular a la estación de control de tierra.

2.7.2.4 Control de la retransmisión de comunicación

Controla la retransmisión de la comunicación por radio.

2.7.2.5 Interfaz del controlador de vuelo

Realiza la comunicación directamente con el controlador de vuelo, a través, del puerto USB.

2.7.2.6 Interfaz del sistema de comunicación

Se encarga de gestionar el tráfico de mensajes de bajo nivel entre el subsistema de control de misión y las telemetrías, con la recepción de los paquetes de retransmisión y la comprobación de errores.

2.7.3 Proceso de retransmisión

Al presentarse la necesidad de retransmisión el nodo encargado de esto (VANT inicial), debe ser capaz de manejar el enrutamiento de los paquetes. Los VANTs utilizaron los ID de origen y objetivo para enrutar o filtrar los paquetes, de la siguiente manera:

- VANT terminal: es el receptor terminal y solo recibe paquetes de inicial. Solo guarda paquetes cuya ID de objetivo sea igual a la del VANT terminal.
- VANT inicial: funciona como nodo de retransmisión, y también recibe comandos de la estación de control de tierra, por lo tanto guarda paquetes cuya ID objetivo sea la del VANT inicial y retransmite paquetes con el ID del VANT terminal por la telemetría T2-1.



Gráfico 17-2. Diagrama de flujo de retransmisión en el VANT terminal
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

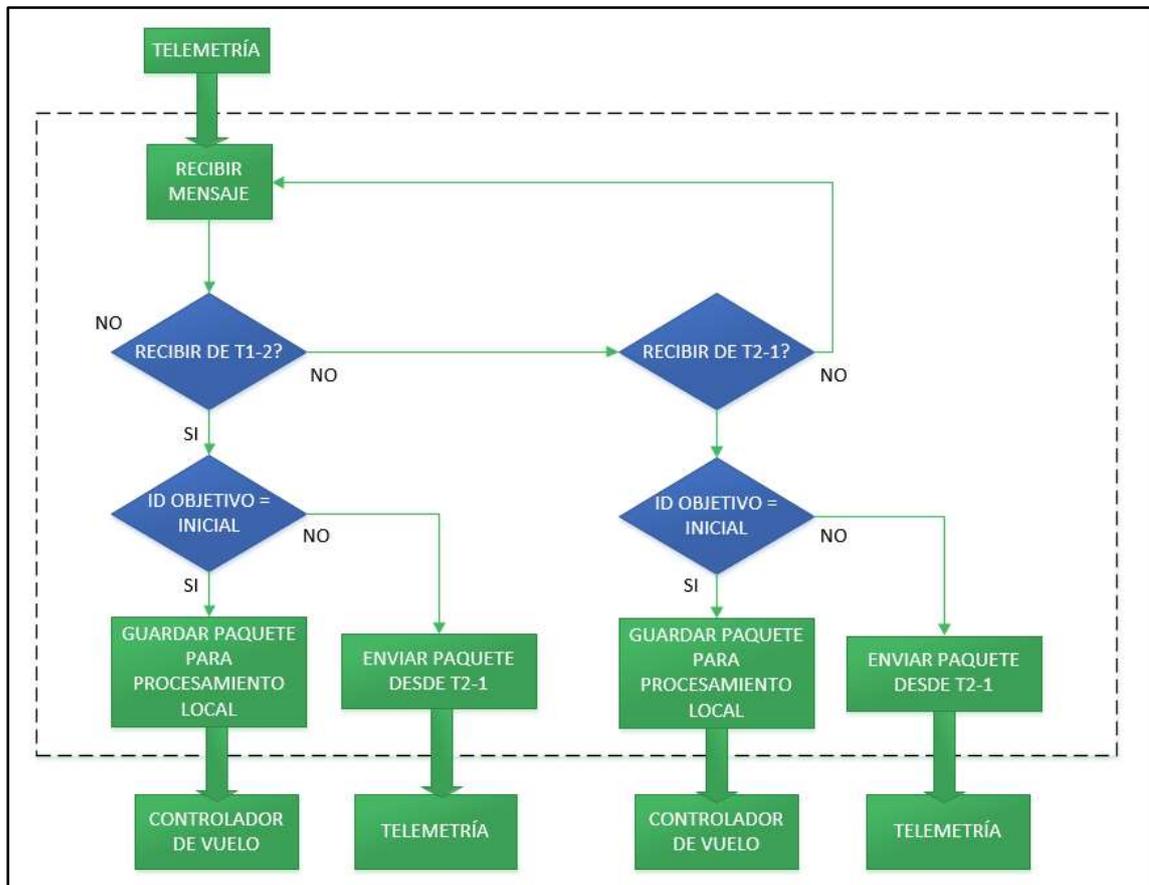


Gráfico 18-2. Diagrama de flujo de retransmisión en el VANT inicial
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En el gráfico 17-2 y 18-2, se pueden observar los diagramas de flujo de retransmisión de los VANTs inicial e terminal. En el último campo de la trama de paquete contenía un código de verificación de redundancia cíclica a cuatro bytes (CRC), el cual se calculó utilizando el polinomio CRC IEEE 802.3 de 32 bits. Es importante porque verifica, al paquete de datos y este se encuentre correcto y protege al sistema de la influencia de datos o mensajes dañados. Si a los VANTs llegaran mensajes incorrectos pueden ser mal interpretados lo cual provocaría un comportamiento peligroso e impredecible de los mismos.

2.7.3 HMI de la estación de control de tierra

Para el control de la estación de tierra fue necesario desarrollar un software para este propósito. Al ser desarrollada bajo el sistema operativo Windows, tiene compatibilidad con diferentes versiones como Windows 7, 8 y 10. Entre sus funciones principales se encuentran la visualización de información sobre los VANTs, el intercambio de datos y una pequeña interfaz para en donde el usuario sea capaz de enviar comandos.

Esta HMI permite a los usuarios controlar el estado de los VANTs y las misiones todo desde un solo lugar, convirtiendo a la estación de control de tierra en un nodo importante en el proceso de retransmisión de la comunicación. Se desarrolló con Visual Studio 2012, utilizando el lenguaje C#.

Como se puede ver en la figura 11-2, se encuentra la HMI desarrollada, la cual tiene las siguientes características más importantes:

- Visualización del estado del VANT: muestra datos importantes como el estado de la comunicación, GPS, modo de vuelo, altitud, velocidad, etc.
- Interfaz de comando: permite a los usuarios enviar comandos específicos al VANT, como despegar, cambiar modo de vuelo, aterrizaje, regreso al lanzamiento, etc.
- Visualización de posición: muestra la posición en tiempo real de la estación de tierra en un mapa en donde se desarrolle la misión.

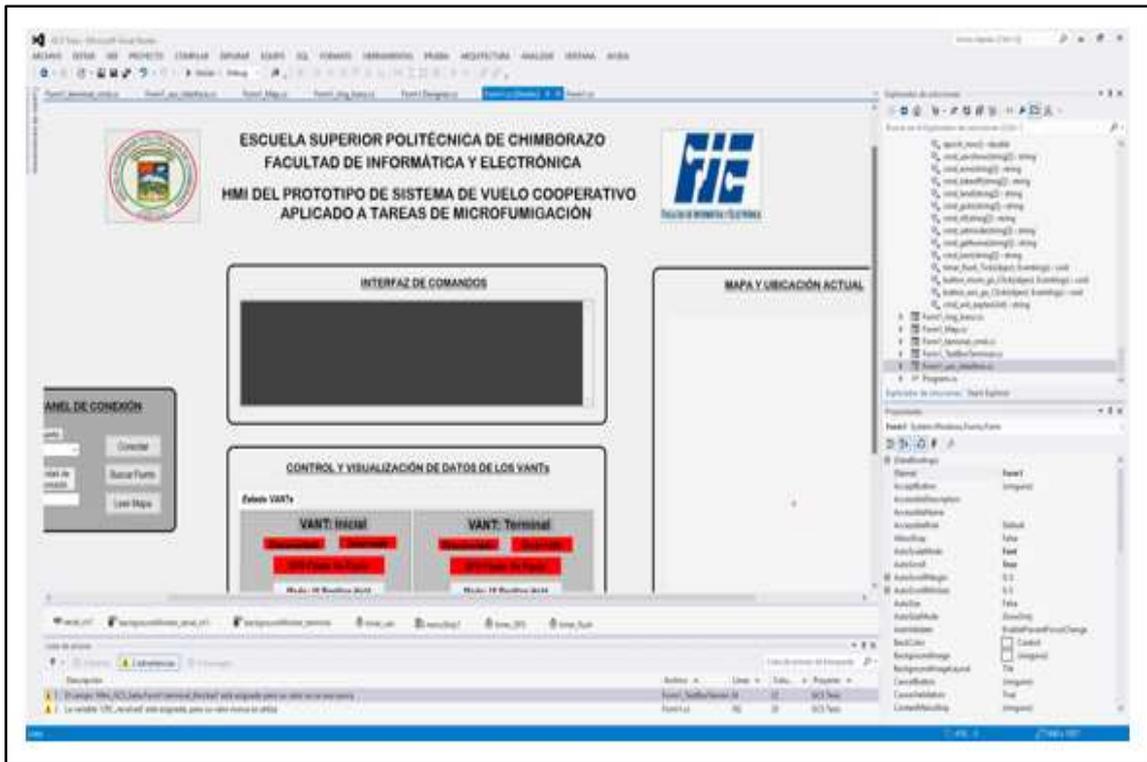


Figura 11-2. HMI de la estación de control de tierra realizada en C#
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Algunos de los comandos utilizados para el control de los VANTs se describen en la tabla 7-2.

Tabla 7-2. Lista de comandos disponibles para el uso en la HMI

Comando	Función
all_cmd	Permite visualizar todos los comandos disponibles para su utilización
arm	Arma al VANT seleccionado
gethome	Obtiene las coordenadas del lugar en donde se encuentre la estación de tierra
goto	Envía coordenadas al VANT para dirigirse a un punto específico
help	Proporciona ayuda acerca de la sintaxis de los comandos para su uso
land	Aterrizza al VANT en la posición que se encuentre en ese momento
rtl	Aterrizza al VANT en el lugar en donde se produjo el lanzamiento
setmode	Cambia el modo de vuelo del VANT por el deseado por el usuario
take_off	Despega al VANT en el lugar que se encuentre en ese momento
turn	Gira al VANT de acuerdo a los ángulos roll, pitch y yaw enviados por el usuario
uavshow	Muestra el estado de los VANTs y la estación de control de tierra

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.8 Programación del controlador de vuelo

Para la programación del controlador de vuelo, en especial para calibrar sus giroscopios, acelerómetros y barómetro se utiliza el software Mission Planner, el cual es open source lo cual ayuda de gran manera a los programadores y desarrolladores.

2.8.1 Programación con Mission Planner

Para la configuración de los distintos sensores del controlador vuelo se abre el programa, y se selecciona la opción INITIAL SETUP, y se abre una pequeña ventana en donde se selecciona el tipo de vehículo a utilizar tal y como se ve en la figura 12-2 y en este caso se coge Multirotor.



Figura 12-2. Pantalla de selección del tipo de vehículo
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Una vez que se elige el vehículo, después la ventana cambia para la selección del tipo de frame en este caso un cuadricóptero tal y como se observa en la figura 13-2.

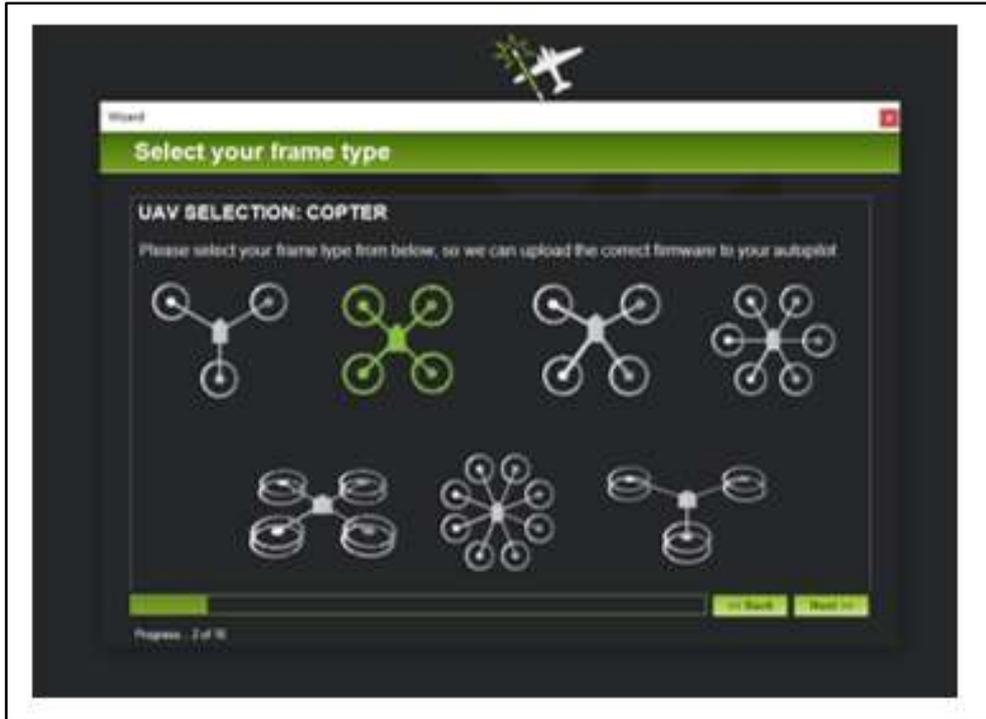


Figura 13-2. Pantalla de selección del tipo de frame
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Enseguida después de elegir el frame se escoge el puerto COM de la computadora en donde esté conectado el controlador de vuelo para subir el firmware adecuado como se ve en la figura 14-2.

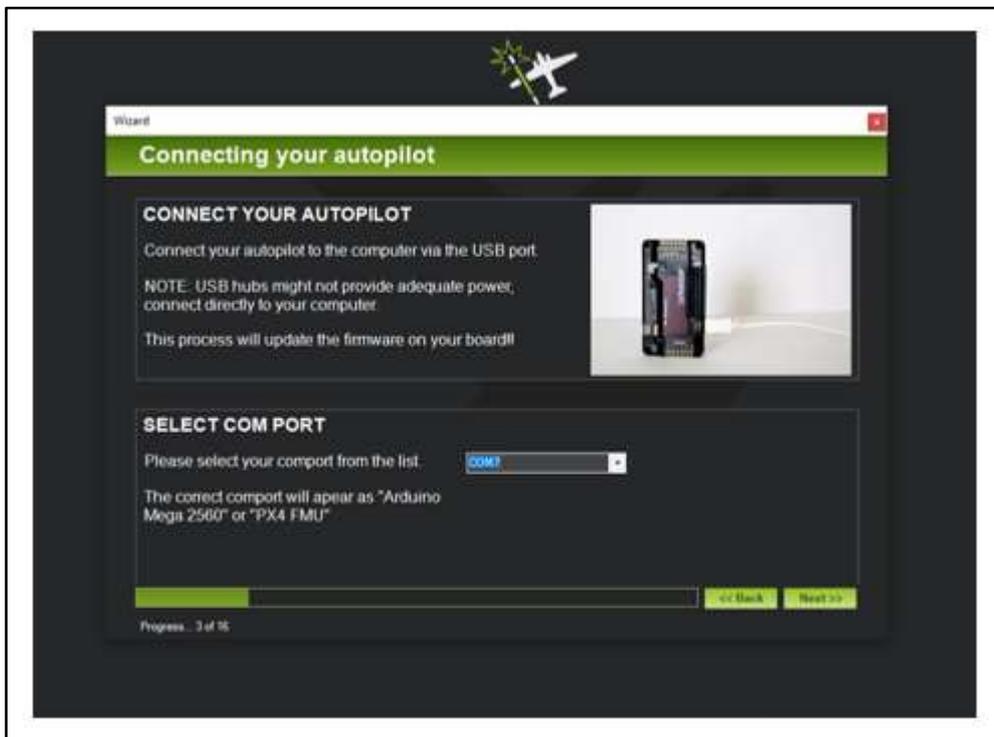


Figura 14-2. Pantalla de selección del puerto COM correspondiente
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Una vez realizada la comunicación serial entre el software y con el controlador de vuelo se deben calibrar los acelerómetros, se debe ubicar al VANT dependiendo las posiciones solicitadas por el setup tal y como se ve en la figura 15-2.

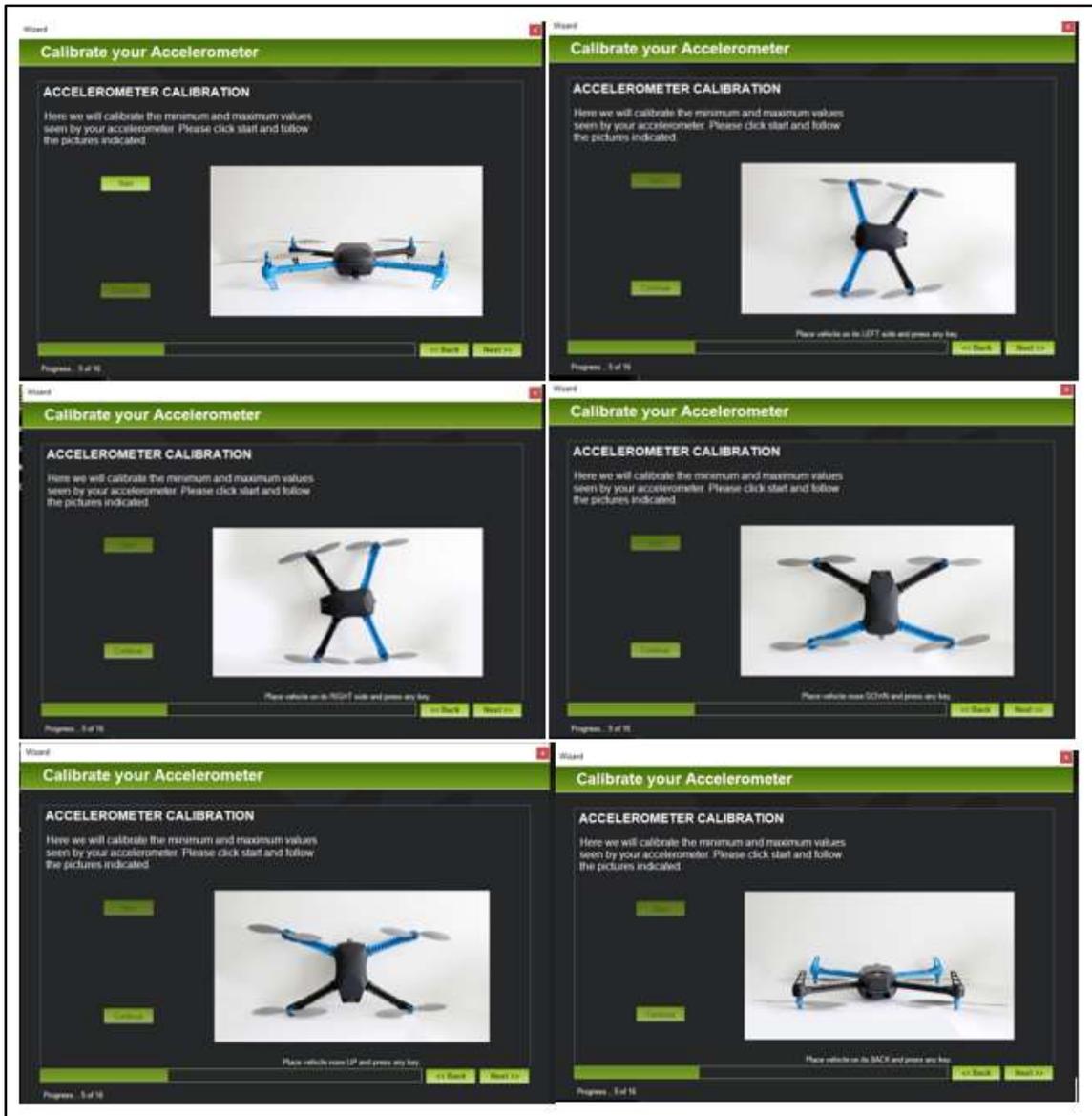


Figura 15-2. Posiciones para la calibración de los acelerómetros del VANT
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Lo único restante por calibrar es la brújula, y para realizarla se debe girar en círculos al VANT en todas las posiciones anteriormente mostradas y a diferentes grados de inclinación y el software guarde los valores en el controlador de vuelo, como se ve en la figura 16-2.

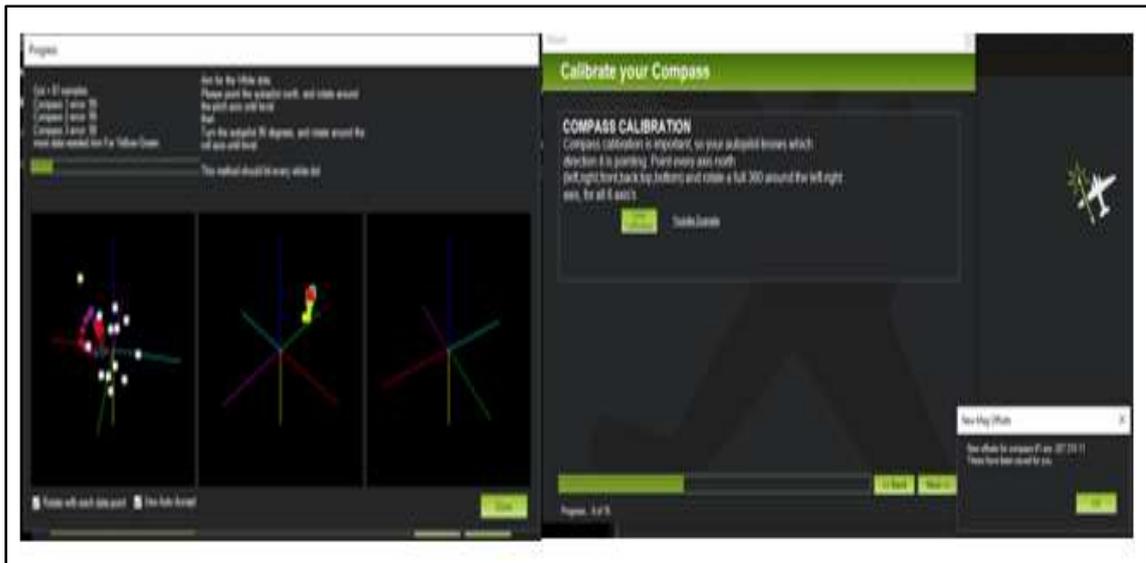


Figura 16-2. Calibración de la brújula
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.8.2 Configuración de modos de vuelo

El controlador utilizado, posee diferentes modos de vuelo, los cuales van desde el manual hasta el autónomo, y a continuación se describen los diferentes modos.

Aunque se describen todos los modos de vuelo, el software permite configurarlos seis para utilizarlos en el controlador de vuelo y los utilizados son:

- Loiter
- Auto
- Manual
- Altitude hold
- Simple
- Super simple

El control remoto elegido posee dos switches el A y B de 2 y 3 posiciones respectivamente y se utilizan para cambiar los diferentes de vuelo anteriormente configurados.

2.8.2.1 *Altitude Hold Mode*

El VANT mantendrá una altitud constante, permitiendo a la persona encargada del VANT maniobrar el alabeo, cabeceo y guiñada.

2.8.2.2 *Loiter*

El VANT se nivela automáticamente para mantener la posición y altitud. Este modo es de gran ayuda para la persona encargada del control de la aeronave.

2.8.2.3 *RTL Mode*

En este modo la aeronave o VANT es piloteada desde su posición actual hasta el lugar del lanzamiento.

2.8.2.4 *Auto Mode*

En el modo automático, el VANT seguirá una misión de vuelo antes programada, conformada por comandos de navegación.

2.8.2.5 *Acro*

Este modo es útil para realizar acrobacias de vuelo como flips o rolls. La aeronave mantendrá la posición actual, aunque no existan señales para estabilizar al mismo.

2.8.2.6 *Sport*

El modo deportivo es útil para volar vista de primera persona (FPV) y la grabación en lugares complicados, el VANT puede ser colocado en una posición determinada y mantendrá la misma hasta ser colocado en otra posición.

2.8.2.7 *Drift*

Este modo de vuelo permite usar al VANT como si fuera un avión con tiempos automáticos coordinados.

2.8.2.8 *Guided Mode*

La aeronave es guiada de forma inalámbricamente a un punto de localización específico, por medio de telemetría o una aplicación de estación de tierra.

2.8.2.9 *Circle Mode*

El VANT volará en círculos sobre el punto de interés, manteniendo la cara frontal del mismo apuntando hacia el centro.

2.8.2.10 *Position Mode*

Mantiene las mismas características del modo Loiter pero el operador controla manualmente el acelerador. El VANT mantendrá una altitud y posición constante con el control manual del acelerador.

2.8.2.11 *Land Mode*

Este modo es útil en donde el VANT realizara un aterrizaje seguro en tierra.

2.8.2.12 *Follow me Mode*

En esto modo de vuelo el VANT pueda seguir los movimientos del operador utilizando radios de telemetría y una estación a tierra.

2.8.2.13 Simple y Super simple Mode

Permite al operario encargado del control del VANT, maniobrarlo desde el punto de vista del piloto, sin importar la localización en la cual se encuentre el mismo.

2.8.3 Configuración de un plan de vuelo

Una de las características, del software utilizado es tener un mapa global para trazar diferentes trayectorias, en el terreno en donde se llevarán a cabo misiones encomendadas por el usuario.

Si al momento de trazar la ruta, la cual deberá seguir el VANT, la estación de control de tierra no posee internet, será necesario tener las coordenadas de cada punto de la trayectoria. Los pasos para la planificación de cualquier vuelo autónomo a realizar por el VANT son:

- Identificar el terreno en donde se desee volar el VANT
- Ubicar los puntos con coordenadas de la trayectoria a seguir
- Con la ayuda del software elaborar la ruta a seguir



Figura 17-2. Ruta autónoma realizada en Mission Planner
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Ahora solo es necesario conectar al VANT con la estación de control de tierra mediante telemetría o cualquier canal de comunicación deseado por el usuario. Para cada punto de la trayectoria se debe pulsar el botón “Escribir WPs”, como se ve en la figura 18-2.



Figura 18-2. Botón “Escribir WPs”

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Por último, si el usuario desea realizar cualquier vuelo autónomo, se debe escoger el modo automático para realizarlo sin problemas.

2.9 Programación de la tarjeta de desarrollo de hardware

En la tarjeta de desarrollo de hardware elegida, se necesita realizar los scripts necesarios para el sistema de retransmisión de comunicación. El lenguaje nativo sobre Raspberry es Python y también se puede utilizar C++, los cuales son muy versátiles para este tipo de aplicaciones.

Ros con la librería Roscpp permitió desarrollar los scripts en C++. Se utilizó el sistema operativo Ubuntu Xenial distribuido por Ubiquity Robotics. Ros Kinematic venía instalado en esa imagen para la tarjeta de desarrollo de hardware.

2.9.1 Scripts desarrollados

Un script es un archivo simple, el cual contiene diferentes órdenes para el cumplir con una función encomendada por el usuario.

Los scripts desarrollados consistieron en:

- Secuencia de inicio para inicializar el servicio automáticamente al energizar la tarjeta de desarrollo
- Inicializar automáticamente los servicios de la librería MAVROS y del núcleo ROS
- Inicio automático del VANT inicial
- Inicio automático del VANT terminal
- Intercambio de información entre los VANTs y el HMI desarrollado en la estación de control de tierra
- Procesamiento de tramas de datos en las telemetrías (envío y recepción por el puerto serial).
- Verificación de la conexión de los puertos en la tarjeta de desarrollo

Para el funcionamiento de estos scripts, en la tarjeta de desarrollo es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Enlazar los scripts desarrollados a su espacio de trabajo catkin, Se debe tener instalado correctamente Ros Kinematic, MAVros y MAVlink para una compilación correcta.
2. Abrir sysid.h, para configurar el nodo dependiendo si es el VANT inicial o terminal.
3. Compilar
4. En los scripts para inicializar cualquier servicio cambiar las rutas de acuerdo al home y user del sistema operativo en donde se esté ejecutando.
5. Agregar el espacio de trabajo catkin, en la configuración del sistema operativo para iniciarlo al momento del encendido.

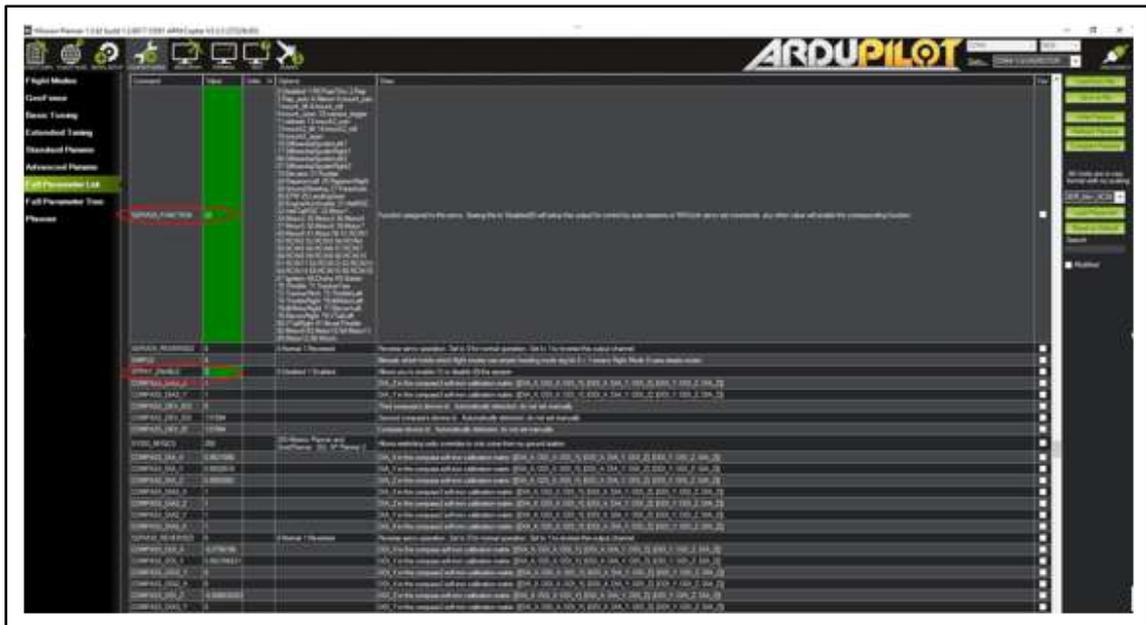


Figura 20-2. Parámetros necesarios para activar y configurar el pulverizador.
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.10.2 Configuración del pulverizador

Para configurar el rango de PWM del pulverizador se pueden configurar los parámetros SERVO9_MIN y SERVO9_MAX, dependiendo de la necesidad del usuario.

En la figura 21-2, se puede ver los valores máximos y mínimos de PWM para el pulverizador.

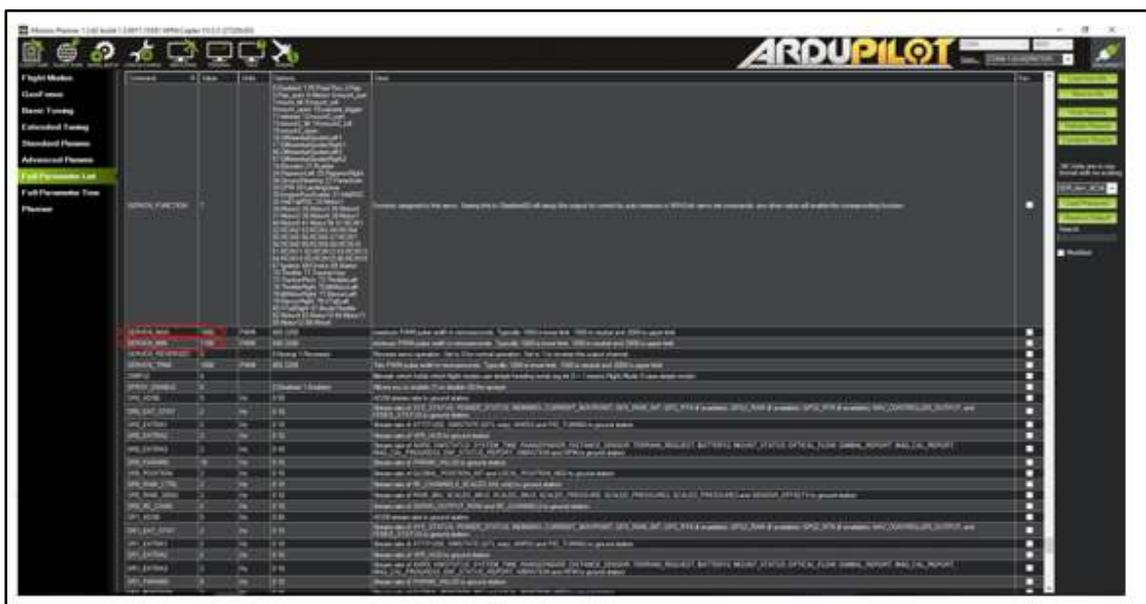


Figura 21-2. Valores PWM máximos y mínimos para el pulverizador.
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Existen valores predeterminados para diferentes parámetros para el funcionamiento del pulverizador, los cuales son:

- **SPRAY_PUMP_MIN**: controla la tasa de bombeo, lo cual significa cuando el VANT se detiene, también el pulverizador, por defecto se encuentra en 10%.
- **SPRAY_PUMP_RATE**: controla la velocidad de bombeo, por defecto está configurado al 10%, por lo cual, si el VANT acelera hasta los 10 m/s, el pulverizador alcanzara el 100%.
- **SPAY_SPEED_MIN**: establece la velocidad mínima del VANT, a la cual el pulverizador se activará. El valor predeterminado es 100, por lo cual se activará cuando se llegue a una velocidad de 1 m/s.

2.11 Diseño realizado en SOLIDWORKS 2017

Una vez definido todos los requerimientos, se seleccionó el hardware necesario y se analizó la arquitectura y las funciones a realizar por cada VANT, se procedió a hacer un diseño tridimensional con la ayuda del software SOLIDWORKS 2017.

Este diseño es útil para ayudar a la implementación física, por la adecuación de todos los componentes usados de una manera ordenada y sistemática, con el fin de evitar cualquier accidente o problema, en la etapa de pruebas del sistema de vuelo cooperativo.

Como se observa en la figura 22-2, el VANT tiene todo el hardware, el mismo será de gran ayuda para el usuario al servir como guía en la implementación.

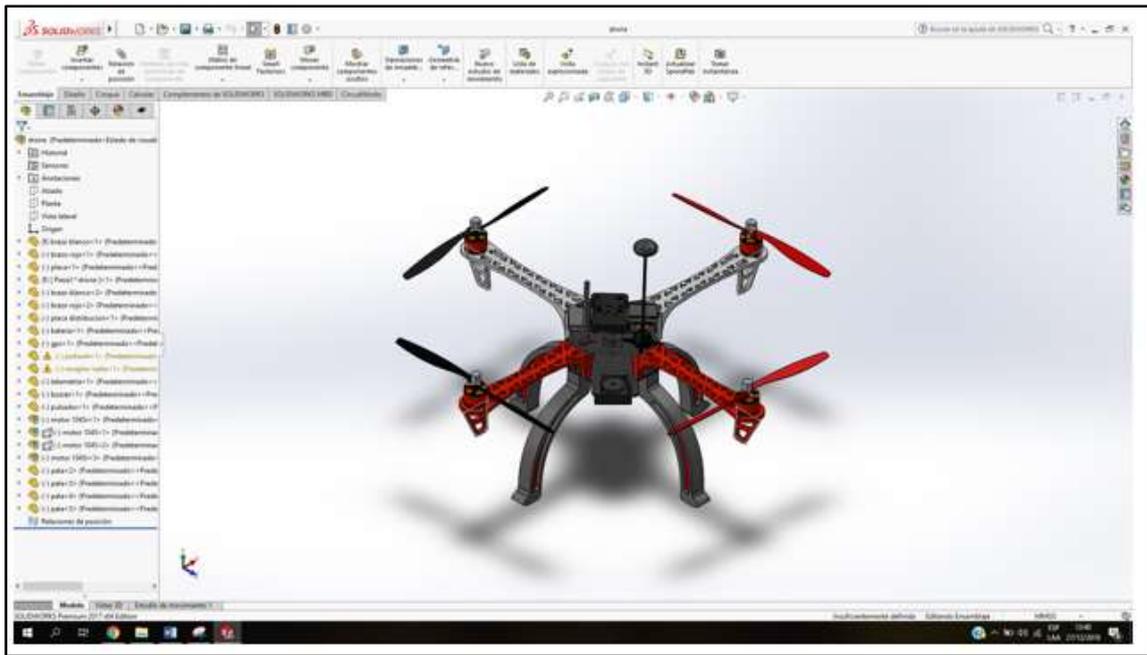


Figura 22-2. Modelo tridimensional del VANT realizado en SOLIDWORKS 2017
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

2.12 Implementación de los VANTs

Una vez programados correctamente el controlador de vuelo y la tarjeta de desarrollo de hardware, se procede con la implementación física de los VANTs, para comprobar su correcto funcionamiento.

El primer paso en la implementación es el de colocar a los motores en cada brazo del frame, según el sentido de rotación ya sea CW o CCW, sujetándolos firmemente con la ayuda de tornillos. El siguiente paso, es soldar los ESC de acuerdo a las especificaciones antes mencionadas, para aislar la soldadura se ocupó materiales termo retractiles como se observa en la figura 23-3.



Figura 23-2. Soldadura de los ESC a los motores
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Cuando se hayan soldado todos los ESC a los motores, el siguiente paso es soldar los cables, los cuales van conectados a la batería a la placa de distribución y aislar las soldaduras como se observa en la figura 24-2.

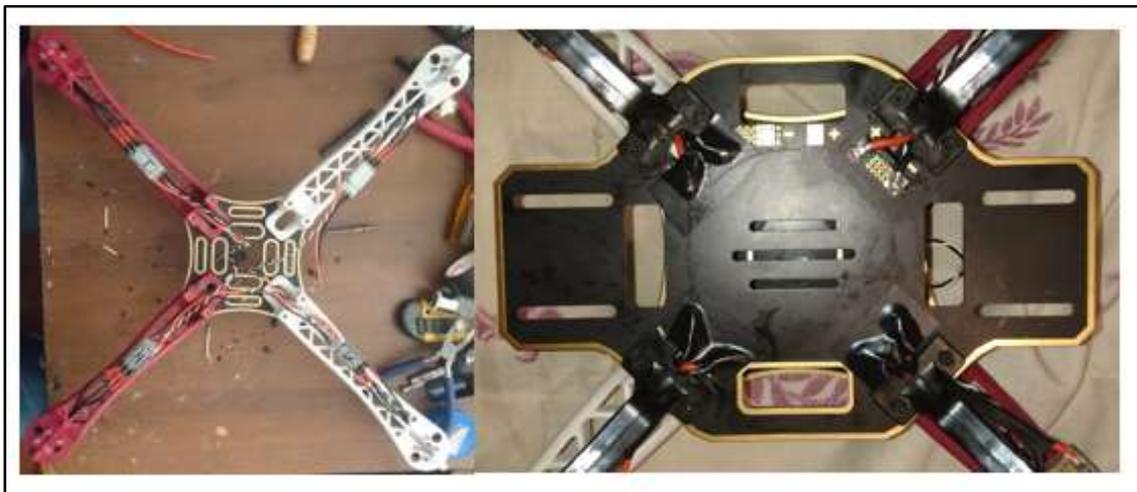


Figura 24-2. Soldadura de los ESC a la placa de distribución
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Después de soldar todos los elementos necesarios se coloca el controlador de vuelo, la tarjeta de desarrollo de hardware y demás elementos de acuerdo al modelo tridimensional realizado. Un VANT totalmente implementado se puede ver en la figura 25-2.



Figura 25-2. VANTs totalmente implementado
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

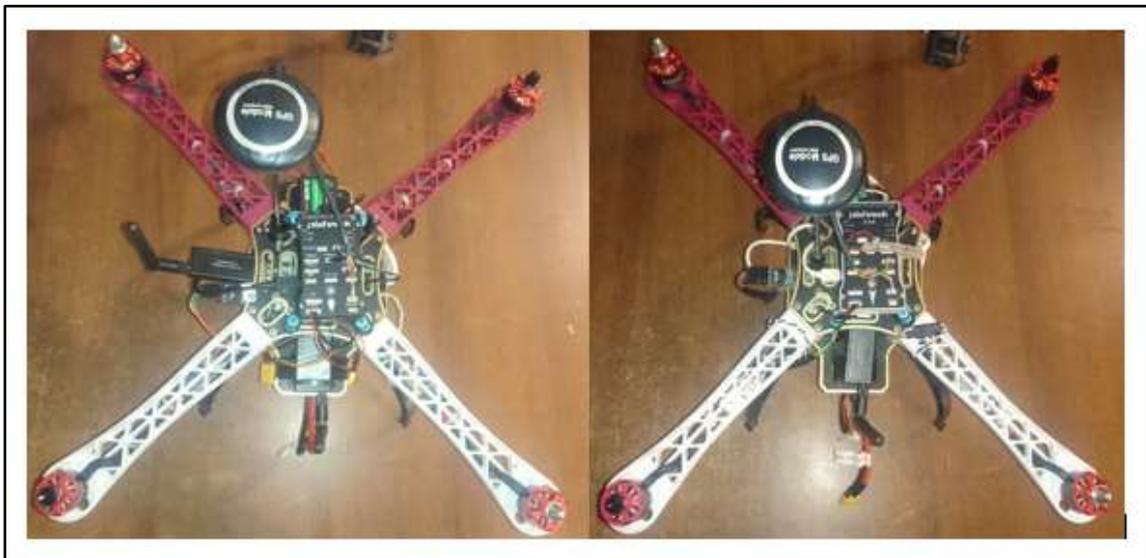


Figura 26-2. VANTs inicial y terminal
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

CAPÍTULO III

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

3.1 Pruebas de los componentes de los VANTs

Las pruebas descritas sirvieron para comprobar el estado idóneo y funcionamiento correcto de los componentes de los VANTs, para evitar accidentes y precautelar la seguridad de los operarios en las pruebas de vuelo y del sistema de retransmisión.

3.1.1 Prueba de la batería

Para comprobar el correcto estado de la batería, fue necesario el uso de un multímetro para medir el voltaje en cada celda, el cual debe ser de 3.4 V. En la tabla 3-1, se presenta un resumen de los voltajes de las celdas de las baterías utilizadas en los VANTs.

Tabla 1-3. Voltajes de las baterías de los VANTs

Batería VANT inicial		
Celda	Voltaje	Estado
1	3.82 V	OK
2	7.66 V	OK
3	11.46 V	OK
Batería VANT terminal		
Celda	Voltaje	Estado
1	3.82 V	OK
2	7.66 V	OK
3	11.46 V	OK

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como se puede ver en la figura 1-3, se puede ver las pruebas realizadas a las baterías de los VANTs, evidenciando el correcto voltaje de las celdas y dando una aprobación satisfactoria las mismas.

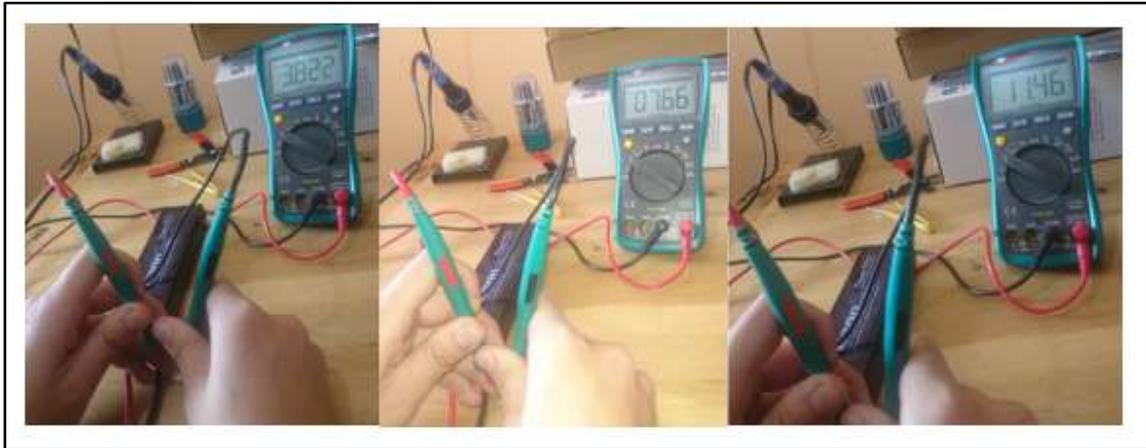


Figura 1-3. Pruebas realizadas a las baterías de los VANTs
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.1.2 Prueba del controlador de vuelo

La prueba realizada al controlador de vuelo, consistió en energizar el mismo, observando a todos los indicadores leds funcionar adecuadamente y de igual manera el buzzer y switch de seguridad. En la tabla 2-3, se observa un resumen de las pruebas realizadas a los controladores de vuelo de los VANTs.

Tabla 2-3. Estado de los componentes de los controladores de vuelo de los VANTs

Controlador de vuelo VANT inicial	
Componente	Estado
Indicadores Led	OK
Buzzer	OK
Switch	OK
Controlador de vuelo VANT terminal	
Componente	Estado
Indicadores Led	OK
Buzzer	OK
Switch	OK

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Una vez realizada las pruebas necesarias para comprobar el estado de los controladores de vuelo y como se ve en la figura 2-3, los mismos se encuentran en un excelente estado para su funcionamiento.

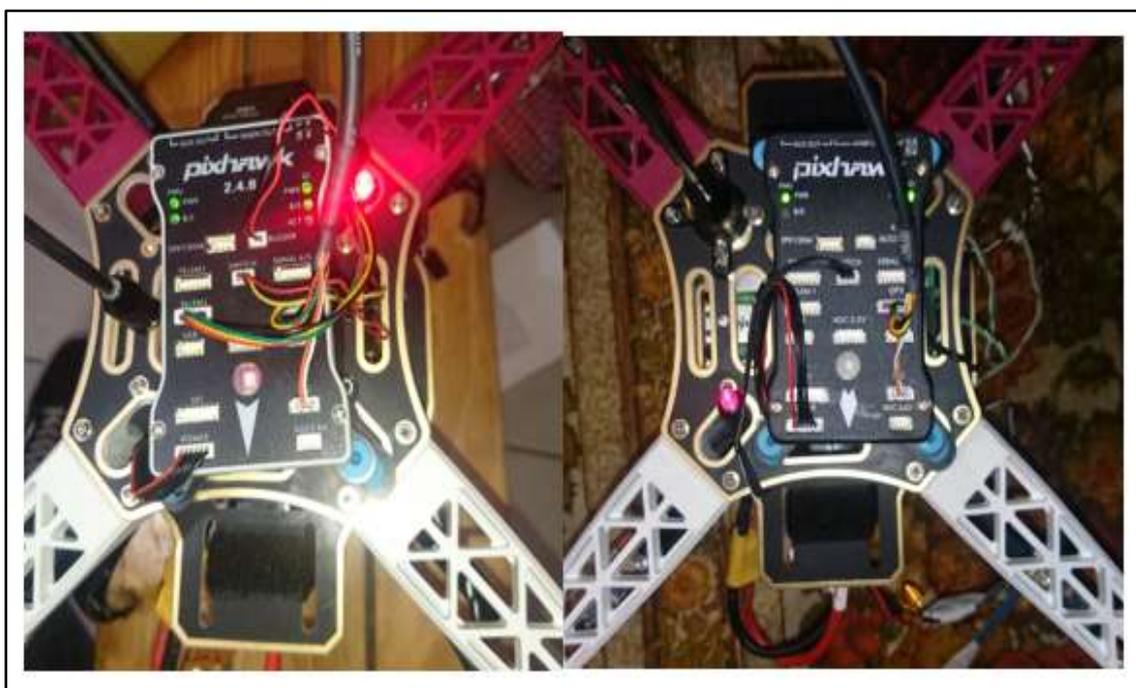


Figura 2-3. Pruebas realizadas a los controladores de vuelo de los VANTs
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.1.3 Prueba de los módulos de telemetría

La prueba realizada a los módulos de telemetría consistió en formar un enlace de comunicación entre la estación de tierra y el controlador de vuelo con la ayuda del software Mission Planner. En la tabla 3-3, se ve puede observar el estado de los módulos de telemetría usados en los VANTs.

Tabla 3-3. Estado de las telemetrías de los VANTs

Módulo de telemetría VANT inicial	
Componente	Estado enlace comunicación
Receptor y transmisor	OK
Módulo de telemetría VANT terminal	
Componente	Estado enlace comunicación
Receptor y transmisor	OK

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la figura 3-3, se ve las pruebas realizadas a los módulos de comunicación, los cuales funcionan correctamente al ser capaces de formar un enlace de comunicación entre la estación de control de tierra y el controlador de vuelo.



Figura 3-3. Pruebas realizadas a los módulos de telemetría de los VANTs
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.1.4 Prueba del transmisor y receptor

La prueba realizada al transmisor y receptor consistió en la verificación del transmisor el cual debe estar configurado con el protocolo PPM revisando su menú de ajustes y con la ayuda del software Mission Planner se comprueba la recepción de al controlador de vuelo. En la tabla 4-3, se ve un resumen de las pruebas realizadas.

Tabla 4-3. Estado de los transmisores y receptores de los VANTs

Transmisor y receptor VANT inicial	
Componente	Estado
Transmisor configurado con protocolo PPM	OK
Señal captado por el receptor	OK
Transmisor y receptor VANT terminal	
Componente	Estado
Transmisor configurado con protocolo PPM	OK
Señal captado por el receptor	OK

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como se observa en la figura 4-3, se evidencia las pruebas realizadas al transmisor y receptor de ambos VANTs, los cuales están configurados con el protocolo PPM y funcionan correctamente al recibir la señal y enviarla al controlador de vuelo.



Figura 4-3. Pruebas realizadas a los transmisores y receptores de los VANTs

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.1.5 Prueba del módulo GPS

Para la comprobación del GPS se ubica, a los VANTs adecuadamente, es importante realizar la prueba en un lugar abierto, donde la señal sea captada adecuadamente, en el software Mission Planner aparecerá la ubicación y el estado del led del controlador de vuelo se pondrá verde. En la tabla 5-3, se puede ver el estado de las pruebas realizadas.

Tabla 5-3. Estado de los módulos GPS de los VANTs

Módulo GPS VANT inicial	
Componente	Estado
Ubicación en Mission Planner	OK
Led verde en controlador de vuelo	OK
Módulo GPS VANT terminal	
Componente	Estado
Ubicación en Mission Planner	OK
Led verde en controlador de vuelo	OK

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la figura 5-3, se evidencian las pruebas realizadas a los módulos GPS en donde se observa la captación de la señal en Mission Planner y el led de estado del controlador de vuelo se pone verde, cuando el GPS esta armado.



Figura 5-3. Prueba de posicionamiento realizado a los módulos GPS de los VANTs
 Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.1.6 Prueba de los motores y ESC

En las pruebas realizadas a los motores y sus respectivos ESC, se comprobó la aceleración y desaceleración adecuadas, además de encontrarse girando en el sentido correcto, como una medida de seguridad esta prueba fue realizada sin las hélices. En la tabla 6-3, se refleja el estado de los componentes testeados.

Tabla 6-3. Estado de los motores y ESC de los VANTs

Módulo GPS VANT inicial	
Componente	Estado
ESC y motores giro CW	OK

ESC y motores giro CCW	OK
Módulo GPS VANT terminal	
Componente	Estado
ESC y motores giro CW	OK
ESC y motores giro CCW	OK

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la figura 6-3, se observa las pruebas a las cuales fueron sometidos los motores y los ESC, evidenciando el respectivo giro de los mismos, además, los mismos deben tener la capacidad de acelerar y frenar adecuadamente.



Figura 6-3. Pruebas realizadas a los motores y ESC de los VANTs

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.1.7 Prueba de la tarjeta de desarrollo de hardware

Las tarjetas de desarrollo utilizadas para el sistema de retransmisión, fueron sometidas a pruebas en donde se comprobó el correcto funcionamiento, conectándolas a un monitor HDMI y comprobando el entorno del sistema operativo ejecutado. En la tabla 7-3 se observa el resumen de las pruebas realizadas.

Tabla 7-3. Estado de las tarjetas de desarrollo de hardware de los VANTs

Tarjeta de desarrollo de hardware VANT inicial	
Componente	Estado
Correcto funcionamiento de los puertos	OK
Ejecución del sistema operativo	OK
Tarjeta de desarrollo de hardware GPS VANT terminal	
Componente	Estado
Correcto funcionamiento de los puertos	OK
Ejecución del sistema operativo	OK

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la figura 7-3, se observa las pruebas realizadas a las tarjetas desarrollos de hardware, las cuales funcionan correctamente y ejecutan el sistema operativo cargado previamente por el usuario.

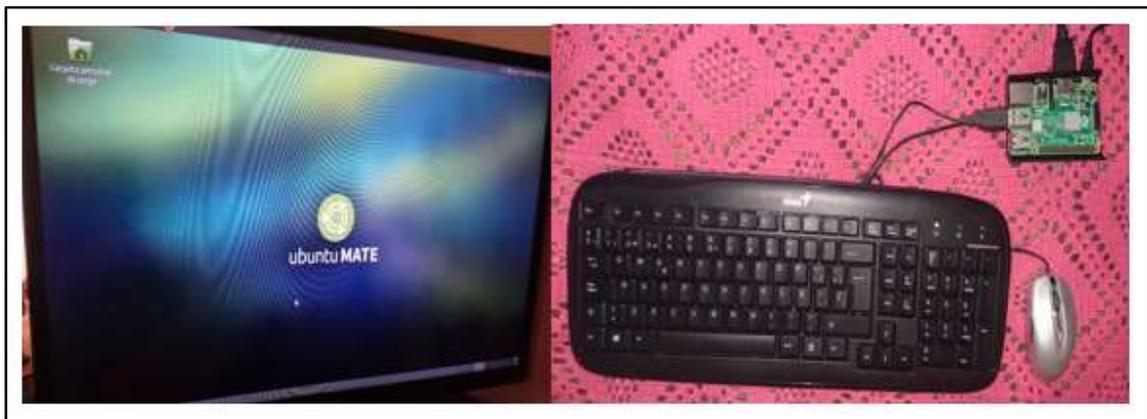


Figura 7-3. Pruebas realizadas a las tarjetas de desarrollo de hardware de los VANTs

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.2 Pruebas de vuelo individual de los VANTs

Para comprobar el funcionamiento de los VANTs se realizaron 15 pruebas de vuelo de manera individual en modo loiter, el cual es muy útil para aprender a controlar y manejar de manera adecuada los mismos por parte del operario.

De la misma forma se realizó 15 vuelos automáticos en cada VANT, para corregir posibles errores o calibrar de mejor manera los sensores para un vuelo fluido.

3.2.1 Modo Loiter

A ambos VANT se realizaron 15 vuelos en modo loiter, para adquirir mayor destreza en el manejo de los mismos, se tomó como medidas el tiempo de vuelo el cual debe llegar a los 10 minutos, para así obtener el porcentaje de pruebas válidas. Para validar la prueba, este debe ser igual o mayor al valor de confianza el cual es el 95%

En la tabla 8-3, se pueden observar las fechas en las cuales fueron realizadas las pruebas, así como el tiempo de vuelo, la diferencia y el porcentaje para la validación de la misma.

Tabla 8-3. Datos de las pruebas de vuelo en modo loiter

N.- vuelo	Fecha y hora	Tiempo de vuelo esperado	Tiempo de vuelo realizado	Diferencia	% de aceptación
1	16-01-2019 09:00	00:10:00	00:10:10	+00:10	100%
2	16-01-2019 12:00	00:10:00	00:10:02	+00:02	100%
3	16-01-2019 16:00	00:10:00	00:10:02	+00:02	100%
4	17-01-2019 09:00	00:10:00	00:09:58	-00:02	99.67%
5	17-01-2019 12:00	00:10:00	00:09:55	-00:05	99.17%
6	17-01-2019 16:00	00:10:00	00:09:54	-00:06	99%
7	18-01-2019 09:00	00:10:00	00:09:57	-00:03	99.5%
8	18-01-2019 12:00	00:10:00	00:10:00	0	100%
9	18-01-2019 16:00	00:10:00	00:09:49	-00:11	98.17%

10	23-01-2019 09:00	00:10:00	00:09:23	-00.37	93.83%
11	23-01-2019 12:00	00:10:00	00:09:20	-00.40	93.33%
12	23-01-2019 16:00	00:10:00	00:09:35	-00.25	95.83%
13	24-01-2019 09:00	00:10:00	00:09:52	-00.08	98.67%
14	24-01-2019 12:00	00:10:00	00:09:45	-00.15	97.5%
15	24-01-2019 16:00	00:10:00	00:09:43	-00.17	97.16%
Media				± 0.103	98.46%

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Las medias que se obtuvieron de la diferencia del tiempo de vuelo entre el deseado y realizado y el porcentaje de aceptación, contrastan que no existe tanta variación entre los datos y los hace adecuados para cualquier estudio estadístico.

En el gráfico 1-3, se puede ver el porcentaje de pruebas realizadas, de donde un 87% de las mismas corresponden a aquellas que obtuvieron un 95% o más, mientras que el 13% representa a las que obtuvieron una ponderación menor al 95%.

Para considerar válida una muestra de datos en estadística, al menos el 75% de los datos deben ser correctos y como se observa para la muestra existe un 87% de datos correctos.



Gráfico 1-3. Porcentaje de pruebas de vuelo en modo Loiter
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la figura 8-3, se evidencia las pruebas realizadas a los VANTs en modo loiter.



Figura 8-3. Pruebas de vuelo realizadas en modo loiter
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.2.2 Modo Auto

En modo auto fueron realizadas 15 pruebas tal y como se realizó en modo loiter. Las métricas usadas para validar las pruebas fueron el tiempo de vuelo y la distancia recorrida, las cuales también serán utilizadas más adelante para el análisis de resultados.

En la figura 9-3, se puede ver la trayectoria a seguir por cada VANT, la dimensión del terreno que cubre cada VANT es de 150 m x 110 m, lo que cada una superficie a cubrir de 1.65 hectáreas, lo cual es muy bueno considerando los tamaños estándar de las parcelas de tierra utilizadas para sembradíos.



Figura 9-3. Trayectoria a seguir por cada VANT en modo auto
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la tabla 9-3, se puede ver todos los datos obtenidos de las pruebas los cuales sirven para validar las mismas.

Tabla 9-3. Datos de las pruebas de vuelo en modo auto

N.- vuelo	Fecha y hora	Tiempo de vuelo esperado	Tiempo de vuelo realizado	Distancia Recorrida	Diferencia	% de aceptación
1	16-01-2019 09:30	00:04:00	00:04:01	664 m	+0.01	100%
2	16-01-2019 12:30	00:04:00	00:04:01	665 m	+0.01	100%
3	16-01-2019 16:30	00:04:00	00:04:01	664 m	+0.01	100%
4	17-01-2019 09:30	00:04:00	00:04:00	663 m	+0.00	100%
5	17-01-2019 12:30	00:04:00	00:04:02	666 m	+0.02	100%
6	17-01-2019 16:30	00:04:00	00:04:03	667 m	+0.03	100%
7	18-01-2019 09:30	00:04:00	00:04:01	665 m	+0.01	100%
8	18-01-2019 12:30	00:04:00	00:04:01	664 m	+0.01	100%
9	18-01-2019 16:30	00:04:00	00:04:03	667 m	+0.03	100%
10	23-01-2019 09:30	00:04:00	00:04:02	666 m	+0.02	100%
11	23-01-2019 12:30	00:04:00	00:04:01	665 m	+0.01	100%
12	23-01-2019 16:30	00:04:00	00:04:03	667 m	+0.03	100%
13	24-01-2019 09:30	00:04:00	00:04:04	668 m	+0.03	100%
14	24-01-2019 12:30	00:04:00	00:04:01	665 m	+0.01	100%
15	24-01-2019 16:30	00:04:00	00:04:01	664 m	+0.01	100%
Media:					+0.016	100%

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Las medias que se obtuvieron de la diferencia del tiempo de vuelo entre el deseado y realizado y el porcentaje de aceptación, contrastan que no existe tanta variación entre los datos y los hace adecuados para cualquier estudio estadístico.

En el gráfico 2-3, se puede ver el porcentaje de pruebas realizadas, de donde un 100% de las mismas corresponden a aquellas que obtuvieron un 95% o más, mientras que no existen pruebas que obtuvieron menos del 95%.

Para considerar valida una muestra de datos en estadística, al menos el 75% de los datos deben ser correctos y como se observa para la muestra existe un 100% de datos correctos.



Gráfico 2-3. Porcentaje de pruebas de vuelo en modo auto
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la figura 9-3, se evidencia las pruebas realizadas a los VANTs en modo auto.



Figura 9-3. Pruebas de vuelo realizadas en modo auto
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.3 Prueba del HMI para vuelo cooperativo

Las pruebas realizadas al HMI, la cual tiene la función de mostrar datos importantes de los VANTs y de la misión que están realizando, consistieron en probar la conexión de la estación de control de tierra con los módulos de telemetría y la recepción y visualización de diferentes datos como altura, modo de vuelo, etc.

En la tabla 10-3 se puede ver las pruebas realizadas y la validación de las mismas la comprobación del correcto funcionamiento.

Tabla 10-3. Pruebas realizadas a la HMI

HMI para vuelo cooperativo	
Pruebas	Validación
Conexión con los módulos de telemetría de los VANTs	100%
Recepción y visualización de datos de vuelo de los VANTS	100%

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la figura 10-3, se puede ver las evidencias para validar correctamente a la HMI.

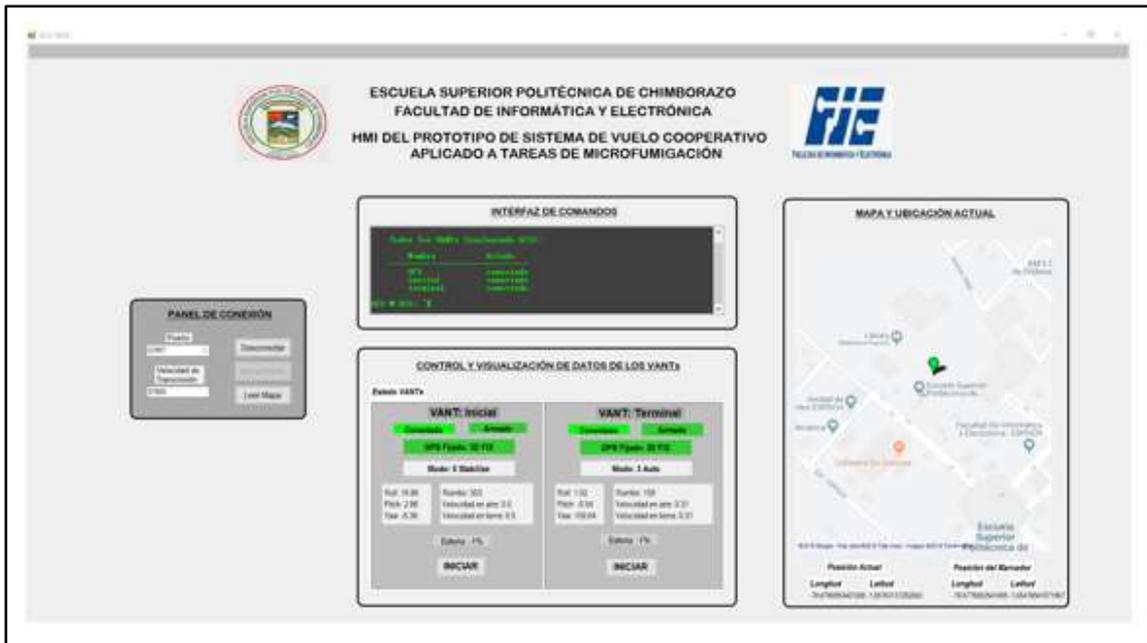


Figura 10-3. Pruebas realizadas a la HMI

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.4 Pruebas del sistema de retransmisión para vuelo cooperativo

Para comprobar que el prototipo del sistema de vuelo cooperativo, funcione correctamente es importante comprobar que el sistema de retransmisión de comunicación cumpla con su objetivo.

El sistema de retransmisión, se encarga de compartir todos los datos entre VANTs, para que la cooperación intencionada se lleve a cabo.

La trayectoria a seguir por los VANTs es la que se muestra en la figura 11-3. La superficie del terreno que cada VANT podrá cubrir es de 1.2 hectáreas, dando un total a cubrir de 2.4 hectáreas. El área 1 a cubrir lo hará el VANT inicial y el área 2 el VANT terminal.



Figura 11-3. Trayectorias para las pruebas del sistema de retransmisión para vuelo cooperativo
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Las métricas utilizadas para validar las pruebas realizadas para el sistema de retransmisión para vuelo cooperativo son las mismas que se utilizaron para las pruebas de vuelo en modo auto, es decir el tiempo y la distancia recorrida por los VANTs, tal y como se puede ver en la tabla 11-3.

Tabla 11-3. Datos de las pruebas del sistema de retransmisión para vuelo cooperativo

N.-vuelo	Fecha y hora	Tiempo de vuelo esperado	Tiempo de vuelo realizado	Distancia Recorrida	Diferencia	% de aceptación
1	30-01-2019 09:30	00:04:00	00:04:02	1349 m	+0.02	100%
2	30-01-2019 12:30	00:04:00	00:04:03	1350 m	+0.03	100%
3	30-01-2019 16:30	00:04:00	00:04:02	1349 m	+0.02	100%
4	31-01-2019 09:30	00:04:00	00:04:02	1349 m	+0.02	100%
5	31-01-2019 12:30	00:04:00	00:04:01	1347 m	+0.01	100%
6	31-01-2019 16:30	00:04:00	00:04:04	1351 m	+0.04	100%

7	01-02-2019 09:30	00:04:00	00:04:05	1352 m	+0.05	100%
8	01-02-2019 12:30	00:04:00	00:04:04	1351 m	+0.04	100%
9	01-02-2019 16:30	00:04:00	00:04:03	1350 m	+0.03	100%
10	04-02-2019 09:30	00:04:00	00:04:02	1349 m	+0.02	100%
11	04-02-2019 12:30	00:04:00	00:04:03	1350 m	+0.03	100%
12	04-03-2019 16:30	00:04:00	00:04:01	1347 m	+0.01	100%
13	05-02-2019 09:30	00:04:00	00:04:02	1349 m	+0.02	100%
14	05-02-2019 12:30	00:04:00	00:04:03	1350 m	+0.03	100%
15	05-02-2019 16:30	00:04:00	00:04:01	1347 m	+0.01	100%
Media:					+0.025	100%

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Observando las medias que se obtuvieron de la diferencia del tiempo de vuelo y el porcentaje de aceptación, indican que todas las pruebas fueron validadas correctamente y son aptas para ser sometidas a cualquier prueba estadística.

En la figura 12-3 se observan las pruebas realizadas al sistema de retransmisión para vuelo cooperativo.



Figura 12-3. Pruebas del sistema de retransmisión para vuelo cooperativo
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

3.5 Análisis de resultados

Para validar el prototipo de sistema de vuelo cooperativo para vehículos aéreos no tripulados, es necesario analizar los resultados que se obtuvieron. Se toman los datos de vuelo en las pruebas de los VANTs en modo auto y del sistema de retransmisión.

Se utiliza la prueba estadística t de Student para dos muestras relacionadas porque se trata de un estudio longitudinal. Esto indica que se tomaron medidas en dos momentos temporales distintos a un mismo grupo.

Antes de empezar con la prueba estadística es útil plantear la hipótesis nula y alterna que se deben comprobar:

- **H₀:** no hay diferencia estadísticamente significativa en la distancia total recorrida al realizar vuelos en modo auto con respecto al prototipo de sistema de vuelo cooperativo.
- **H₁:** si hay diferencia estadísticamente significativa en la distancia total recorrida al realizar vuelos en modo auto con respecto al prototipo de sistema de vuelo cooperativo.

Una vez claros con la hipótesis a considerar, se debe tener en claro las premisas que deben cumplir las muestras para poder aplicar la prueba de t de Student. Los grupos de datos deben ser menores o iguales a 30 y deben tener una distribución normal.

Respecto al número de datos, en cada prueba se realizaron 15 vuelos ya sea en modo auto o cooperativo, lo cual los hace aptos para aplicar la prueba estadística antes mencionada.

Para comprobar la normalidad de los datos se utilizó, el software estadístico SPSS como se ve en la figura 13-3. Los grupos de datos ya se encuentran agrupados en sus respectivas variables.

PROBADA	DISTANCIA RECORRIDA (SPSS)	DISTANCIA RECORRIDA (COOPER)
1	862.00	1047.00
2	862.00	1048.00
3	862.00	1049.00
4	862.00	1048.00
5	862.00	1047.00
6	862.00	1051.00
7	862.00	1052.00
8	862.00	1051.00
9	862.00	1050.00
10	862.00	1049.00
11	862.00	1048.00
12	862.00	1047.00
13	862.00	1048.00
14	862.00	1048.00
15	862.00	1047.00
16	862.00	1047.00
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		
32		
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
41		
42		
43		
44		
45		
46		
47		
48		
49		
50		

Figura 13-3. Datos de las pruebas para el análisis estadístico en el software SPSS
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la tabla 12-3 se observa los resultados de las pruebas de normalidad y se escoge la prueba de Shapiro – Wilk ya que se tiene un numero de datos menor a 50 lo que la convierte en la opción más apropiada. El valor de significación asintótica es mayor a 0.05 por lo que los datos provienen de una distribución normal.

Tabla 12-3. Resultados de las pruebas de normalidad

Pruebas de normalidad							
PRUEBAS	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.	
DISTANCIA_RECORRIDA VUELO AUTO	,202	15	,101	,923	15	,212	
VUELO COOPERATIVO	,212	15	,069	,913	15	,152	

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En el gráfico 3-3 y 3-4, se presentan los gráficos cuantil –cuantil de las pruebas de vuelo auto y cooperativo respectivamente.

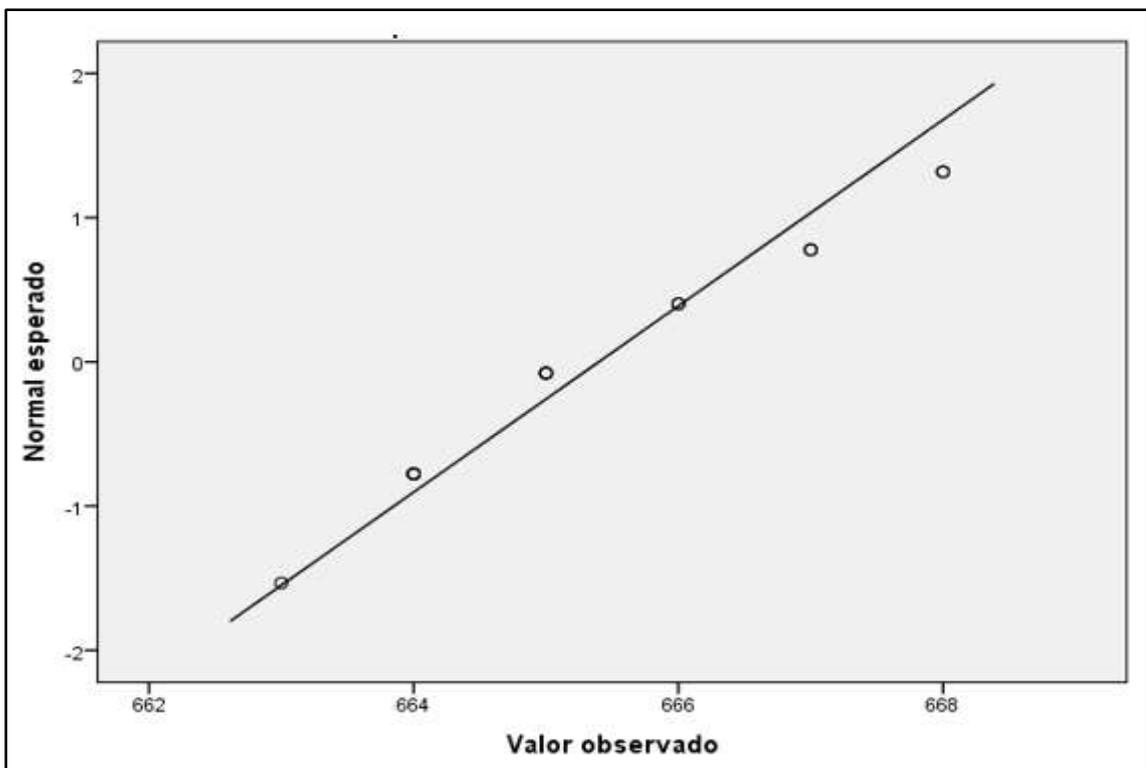


Gráfico 3-3. Gráfico Q – Q normal para pruebas de vuelo auto

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

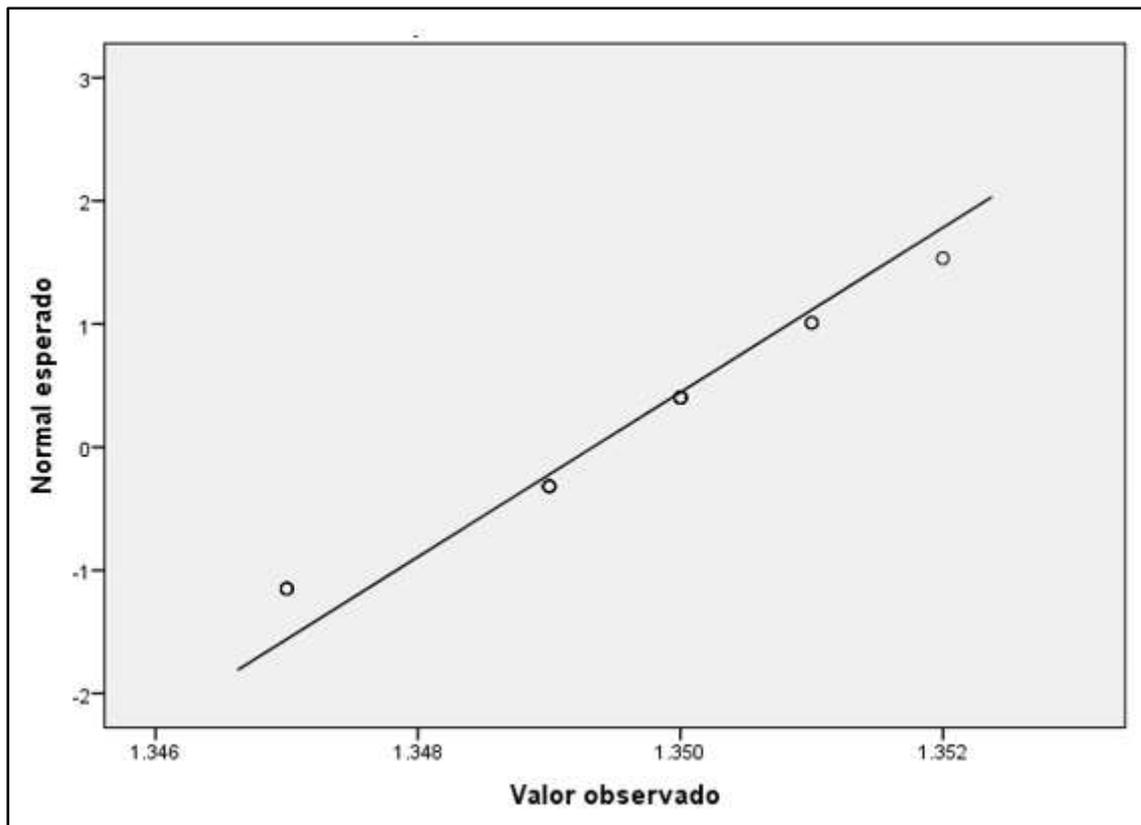


Gráfico 3-3. Gráfico Q – Q normal para pruebas de vuelo cooperativo
Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Con las premisas a cumplir ya claras se realizó la prueba de t de Student. Cabe aclarar que en el software estadístico se deben tener dos variables con los datos a contrastar y escoger la prueba para muestras emparejadas.

Tabla 13-3. Resultados de la prueba t de Student

		Diferencias emparejadas				t	gl	Sig. (bilateral)	
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
					Inferior				Superior
Par 1	DISTANCIA_RECORRIDA_VUELO_AUTO - DISTANCIA_RECORRIDA_VUELO_COOPERATIVO	-683,93333	2,15362	,55606	-685,12597	-682,74070	-1229,956	14	,000

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

En la tabla 13-3, el valor de significancia asintótica o también conocido como valor p es de 0.000 lo cual es mucho menor a 0.05. Se acepta la hipótesis alterna antes planteada.

Finalmente, para terminar el análisis de resultados se dice que si existe una diferencia estadísticamente significativa en la distancia total recorrida al realizar vuelos en modo auto con

respecto al prototipo de sistema de vuelo cooperativo. Esto es muy importante en aplicaciones de microfumigación ya que en un mismo intervalo de tiempo con el prototipo de vuelo cooperativo se puede cubrir más terreno, en vez de utilizar un VANT a la vez en modo auto.

3.6 Análisis de costos

Para realizar el análisis de costos del prototipo de sistema de vuelo cooperativo de vehículos aéreos no tripulados, se enlistan los componentes estructurales y electrónicos necesarios con su respectivo costo.

Tabla 14-3. Análisis de costos

Componente	Cantidad	Costo
Controlador de vuelo Pixhawk	2	\$ 256
Módulos de telemetría 3DR Radio 915 MHz	2	\$ 56
Módulo GPS Ublox Neo M8N	2	\$ 56
Regulador de voltaje APM V1.0	2	\$ 24
Frame F450	2	\$ 38
Batería Lipo 5000 mAh 50c	2	\$ 108
Motores Brushless 2212 / 920 kv	8	\$ 64
Hélices 10 x 4.5	64	\$ 46
ESC BLHeli 30 A	8	\$ 94
Tarjeta de desarrollo de hardware Raspberry Pi 3	2	\$ 130
Convertidor USB-UART CP2102	2	\$ 26
Transmisor y receptor RC FlySky Fs-i6X	2	\$ 156
Hora de ingeniería	180	\$ 1800
Elementos electrónicos varios		\$ 20
Elementos de oficina		\$ 20
Flete		\$ 75
Impuestos		\$ 255
COSTO TOTAL		\$ 3224

Realizado por: (Suqui and Paredes, 2019)

Como se observa en la tabla 14-3, el valor total asciende a 3224 dólares americanos.

CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un prototipo de sistema para vuelo cooperativo de vehículos aéreos no tripulados para aplicaciones de microfumigación.
- Las principales características de los vehículos aéreos no tripulados fueron estudiadas como son los tipos, ventajas y desventajas, funcionamiento y control, las cuales sirvieron de punto de partida para el diseño y construcción.
- Número de VANTs, comunicación y alcance, HMI, alimentación eléctrica y fácil operación fueron requerimientos del prototipo de sistema de vuelo cooperativo los cuales han sido cumplidos exitosamente.
- El sistema que permite la retransmisión de comunicación que fue desarrollado con las técnicas de multiplexación por división de tiempo (TDM) y el espectro expandido de salto de frecuencia (FHSS), fue la pieza clave en el diseño que permitió cumplir con el prototipo de sistema de vuelo cooperativo.
- El controlador de vuelo, módulos de telemetría y la tarjeta de desarrollo de hardware son la parte medular del hardware los cuales fueron seleccionados de acuerdo a la aplicación a ser utilizados, respecto al frame, batería, motores y hélices fue necesario escogerlos respecto a cálculos realizados que garanticen el tiempo de vuelo de 10 minutos y carga útil de 1865 g a ser transportada; Mission Planner y Ubuntu Xelion fueron diseñados para funcionar adecuadamente con el hardware elegido los cuales los hace la mejor opción para la selección del software.
- Al realizar la prueba estadística t de Student, se halló un p valor muy por debajo al 0.05 lo cual indica que hay una diferencia significativa entre el vuelo auto y el cooperativo, evaluando satisfactoriamente y concluyendo que el prototipo de sistema de vuelo cooperativo puede abarcar más terreno en el mismo tiempo, lo cual lo hace útil para la microfumigación ya que optimiza el tiempo.

RECOMENDACIONES

- Añadir más VANTs iniciales a la flota para que la comunicación pueda ser retransmitida y enfocarla a diferentes aplicaciones como supervisión o mitigación de problemas escogiendo el vuelo cooperativo más adecuado.
- Mejorar la tecnología utilizada en esta investigación como otro tipo de frame, motores, batería o la impermeabilización, para que el VANT tenga más posibilidades de tener un tiempo mayor de vuelo, transportar más carga útil o ser utilizado en aplicaciones con mayores exigencias atmosféricas.
- Realizar un estudio para centralizar el intercambio de información para el vuelo cooperativo en una plataforma tecnológica adecuada como es el caso de utilizar AntennaTracker V1.0.0 para el control multi VANT.
- Investigar acerca de la factibilidad de realizar una HMI en un dispositivo móvil para mejorar el control, despliegue y funcionamiento del prototipo de sistema de vuelo cooperativo.

GLOSARIO

VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado): Esta aeronave no cuenta con tripulación por lo que puede emitir vuelos de manera autónoma de modo controlado y sostenido.

C++: Es un lenguaje de programación orientada a objetos, este es un lenguaje nativo, modular y portable viene a ser el lenguaje más común en la programación, por lo que es interactivo.

C SHARP: lenguaje de programación orientada a objetos tiene un lenguaje común y corre en tiempo de ejecución.

HMI: Se llama Interfaz-Hombre-Máquina, es una interfaz gráfica entre el operario y el proceso que se esté llevando a cabo. Es una herramienta muy básica para los inspectores ya que pueden coordinar o controlar procesos de fabricación e industriales.

SCRIPT: Es un conjunto de ordenes o de códigos de programación guardadas en archivo texto son muy livianos un script viene a ser un guion de la programación.

CLOCK WISE (CW) : existen dos posibles direcciones en la rotación bidimensional, el primero se guía por medio de las manecillas del reloj es llamado cw el movimiento empieza de arriba hacia la derecha y de abajo a la izquierda.

COUNTER CLOCK WIRE CCW: Trata de la segunda rotación, este caso muestra un movimiento anti horario llamado ccw donde el movimiento empieza desde arriba hacia la izquierda y de abajo hacia la derecha.

SISTEMA OPERATIVO: Es un conjunto de programas u órdenes que ayudan a la ejecución de varias tareas u otros programas, este es un intermediario entre el computador y el usuario

TELEMETRIA: Es una tecnología que puede rastrear medir o monitorear magnitudes físicas para la ayuda y estudio del operador, el sistema telemétrico ayuda a controlar dispositivos a distancia ya que esta tecnología es inalámbrica por lo cual el operador puede controlarla desde ciertos puntos.

MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE TIEMPO (TDM): Es la transmisión de varias señales digitales por un solo canal, este proceso se logra intercalando las señales para que se envíen de forma secuencial por el mismo canal, de esta manera se logra un mayor aprovechamiento sobre el medio de transmisión

ESPECTRO EXPANDIDO DE SALTO DE FRECUENCIA FHSS: Es una técnica de modulación que se emite sobre una señal de radiofrecuencias aleatorias, van saltando de frecuencia en frecuencia sincrónicamente en intervalos de tiempo con el transmisor sus ventajas son:

- Resistentes al ruido e interferencia
- Difíciles de interceptar

SETUP: Ayuda en las interfaces informáticas al usuario para cambiar las configuraciones u opciones según le convenga.

BIBLIOGRAFÍA

ABDALLAH, R. et al. ‘Fault tree analysis for the communication of a fleet formation flight of UAVs’, 2017, *2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*. IEEE, pp. 202–206. doi: 10.1109/ICSRS.2017.8272821.

ArduPilot, *Radio Telemetry SiK*, 2016. Available at: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-sik-telemetry-radio.html> (Accessed: 21 October 2018).

BRIONES, J. *Estudio de mercado para la importación de drones de fumigación con el fin de ofrecer el servicio en el sector agrícola específicamente en cultivos de arroz, de los cantones Santa Lucía, Daule y Nobol de la provincia del Guayas*, 2018. Available at: http://181.198.116.67/bitstream/40000/364/1/TMMA_UPAC_21050.pdf (Accessed: 28 October 2018).

BURBANO DE ERCILLA, S., BURBANO GARCÍA, E., & GRACIA MUÑOZ, C. *Física general*, 2015. 32.-. Madrid: Editorial Tébar.

CIARLETTA, L. et al. ‘Simulation and platform tools to develop safe flock of UAVs: a CPS application-driven research’, 2014, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, pp. 95–102. doi: 10.1109/ICUAS.2014.6842244.

CLUB ROBÓTICA ESPOCH. *Robótica Espoch*. Available at: <http://robotica.espoch.edu.ec/riotronic-reglamentos.html> (Accessed: 24 October 2018).

EL COMERCIO, ‘Los drones despegan en Ecuador’. 2018. Available at: <https://www.elcomercio.com/guaifai/tecnologia-drones-despegan-ecuador.html> (Accessed: 23 October 2018).

CRESPO, G. et al. ‘Setup of a communication and control systems of a quadrotor type

Unmanned Aerial Vehicle' 2018, in *Design of Circuits and Integrated Systems*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/DCIS.2014.7035590.

DAC, *Resolución 251*, 2015. Available at: <http://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/09/Resol.-251-2015-Normas-Operacion-Drones.pdf> (Accessed: 23 October 2018).

DHIVYA, A. J. A., & PREMKUMAR, J. 'Quadcopter based technology for an emergency healthcare' 2017, *Third International Conference on Biosignals, Images and Instrumentation (ICBSII)*. IEEE, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICBSII.2017.8082284.

DMR, *Statistics of UAVs* 2018. Available at: <https://expandedramblings.com/index.php/drone-statistics/> (Accessed: 22 October 2018).

Dronecode, QGroundControl, 2018. Available at: <https://docs.qgroundcontrol.com/en/> (Accessed: 21 October 2018).

EMMANUEL SANTANA CRUZ, E. & MORENO ORTIZ, R. 'Propuesta de sistema multi-UAV para aplicaciones de cobertura de área' 2017. Available at: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/456309/eesc1de1.pdf?sequence=1> (Accessed: 14 May 2018).

ERLE ROBOTICS *MAVLink*, 2016. Available at: <https://erlerobotics.gitbooks.io/erlerobot/es/mavlink/mavlink.html> (Accessed: 21 October 2018).

FENG, L. & FANGCHAO, Q. 'Research on the Hardware Structure Characteristics and EKF Filtering Algorithm of the Autopilot PIXHAWK', 2016. *Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*. IEEE, pp. 228–231. doi: 10.1109/IMCCC.2016.128.

FERNÁNDEZ-LOZANO, J. & GUTIÉRREZ-ALONSO, G. ‘Revista de la Sociedad Geológica de España 29 (1) APLICACIONES GEOLÓGICAS DE LOS DRONES Geological applications of UAVs’, 2016. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29(1), p. 2016. Available at: www.topografiapirineos.com.

FLEESON, W. et al. ‘No {Title}’ 2017, *Journal of Personality and Social Psychology*, 1(1), pp. 1188–1197. doi: 10.1111/j.1469-7610.2010.02280.x.

HAQUE, S. R., KORMOKAR, R. & ZAMAN, A. U. ‘Drone ground control station with enhanced safety features’ 2017. *2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. IEEE, pp. 1207–1210. doi: 10.1109/I2CT.2017.8226318.

JAZIRI, A., NASRI, R., & CHAHED, T. ‘Congestion mitigation in 5G networks using drone relays’, 2016. *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, pp. 233–238. doi: 10.1109/IWCMC.2016.7577063.

JJ HOBBIES, *Telemetry Px4 Pixhawk*, 2018. Available at: <https://www.jj-hobbies.com/producto/telemetria-433mhz-apm2-6-apm2-8-px4-pixhawk/> (Accessed: 21 October 2018).

KAANICHE, K., DEMONCEAUX, C. & VASSEUR, P. ‘Analysis of low-altitude aerial sequences for road traffic diagnosis using graph partitioning and Markov hierarchical models’, 2016. *13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. IEEE, pp. 656–661. doi: 10.1109/SSD.2016.7473665.

LANG, R., LESCISIN, M. & MAHMOUD, Q. H. ‘Selecting a Development Board for Your Capstone or Course Project’, 2018. *IEEE Potentials*, 37(3), pp. 6–14. doi: 10.1109/MPOT.2017.2716778.

LI, B. et al. ‘Development and Testing of a Two-UAV Communication Relay System.’, 2016, *Sensors (Basel, Switzerland)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 16(10). doi:

10.3390/s16101696.

MELINTON, T. ‘DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DRONE AUTÓNOMO’, 2017. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo.

MOU, Y. et al. ‘The flight control of micro quad-rotor UAV based on PID’, 2016. *31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*. IEEE, pp. 353–356. doi: 10.1109/YAC.2016.7804918.

OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION. *ROS*, 2018. Available at: <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction> (Accessed: 21 October 2018).

PULECIO, R. *Drone Conceptos Básicos*, 2018. 1.-. Bogota: ROBOTRONES. Available at: <https://books.google.com.ec/books?id=TjdYDwAAQBAJ&pg=PT111&dq=trayectoria+drone&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi107rkj5jeAhVqs1kKHc6LAOsQ6AEIJjAA#v=onepage&q=trayectoria+drone&f=false> (Accessed: 21 October 2018).

RAZA, A., et al. ‘A review of low cost and power efficient development boards for IoT applications’, 2016. *Future Technologies Conference (FTC)*. IEEE, pp. 786–790. doi: 10.1109/FTC.2016.7821693.

ECU 911. *VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (UAV)*, 2017. Available at: <http://www.ecu911.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/EQUIPO-DE-MONITOREO-NO-TRIPULADO--DRON1.pdf> (Accessed: 23 October 2018).

SULLIVAN, J. M. ‘Revolution or evolution? the rise of the UAVs’, 2017. *International Symposium on Technology and Society, 2005. Weapons and Wires: Prevention and Safety in a Time of Fear. ISTAS 2015*. IEEE, pp. 95–102. doi: 10.1109/ISTAS.2005.1452718.

EL TELEGRÁFO. ‘Investigadores de Chimborazo buscan reconstruir el pueblo puruhá’, 2018.

29 July. Available at: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/6/arqueologia-chimborazo-cultura-puruha> (Accessed: 24 October 2018).

TORRES, S., & MÉNDEZ, J. A. ‘Seguimiento de Trayectorias en Robots Manipuladores: Revisión de Soluciones y Nuevas Propuestas’, 2015. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 6(4), pp. 80–92. doi: 10.1016/S1697-7912(09)70111-6.

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY. *Ground Control Station GCS*, 2018. Available at: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/map-marine-technologies/portable-ground-control-station-gcs/> (Accessed: 21 October 2018).

VERGARA, R. et al. *Piloto de Drone* 2015. Madrid: Ediciones Paraninfo. Available at: https://books.google.com.ec/books?id=ERCKCwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=piloto+de+dron&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjDg_K5nJHgAhXeGTQIHUaqBYcQ6AEIKDAA#v=onepage&q=piloto+de+dron&f=false.

WANG, J. et al. ‘Taking Drones to the Next Level: Cooperative Distributed Unmanned-Aerial-Vehicular Networks for Small and Mini Drones’ 2017, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(3), pp. 73–82. doi: 10.1109/MVT.2016.2645481.

ANEXOS

Anexo A: Datasheet del controlador de vuelo Pixhawk

RB-Trs-32 3DR PX4 Pixhawk Advanced Autopilot



Pixhawk is an advanced autopilot system designed by the PX4 open-hardware project and manufactured by 3D Robotics. It features advanced processor and sensor technology from ST Microelectronics® and a NuttX real-time operating system, delivering incredible performance, flexibility, and reliability for controlling any autonomous vehicle.

The benefits of the Pixhawk system include integrated multithreading, a Unix/Linux-like programming environment, completely new autopilot functions such as Lua scripting of missions and flight behavior, and a custom PX4 driver layer ensuring tight timing across all processes. These advanced capabilities ensure that there are no limitations to your autonomous vehicle. Pixhawk allows existing APM and PX4 operators to seamlessly transition to this system and lowers the barriers to entry for new users to participate in the exciting world of autonomous vehicles.

The flagship Pixhawk module will be accompanied by new peripheral options, including a digital airspeed sensor, support for an external multi-color LED indicator and an external magnetometer. All peripherals are automatically detected and configured.

Features

- Advanced 32 bit ARM Cortex® M4 Processor running NuttX RTOS
- 14 PWM/servo outputs (8 with failsafe and manual override, 6 auxiliary, high-power compatible)
- Abundant connectivity options for additional peripherals (UART, I2C, CAN)
- Integrated backup system for in-flight recovery and manual override with dedicated processor and stand-alone power supply
- Backup system integrates mixing, providing consistent autopilot and manual override mixing modes
- Redundant power supply inputs and automatic failover
- External safety button for easy motor activation

- Multicolor LED indicator
- High-power, multi-tone piezo audio indicator
- microSD card for long-time high-rate logging

Specifications

Microprocessor

- 32 bit STM32F427 Cortex M4 core with FPU
- 168 MHz/256 KB RAM/2 MB Flash
- 32 bit STM32F103 failsafe co-processor

Sensors

- ST Micro L3GD20H 16 bit gyroscope
- ST Micro LSM303D 14 bit accelerometer / magnetometer
- MEAS MS5611 barometer

Interfaces

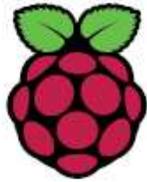
- 5x UART (serial ports), one high-power capable, 2x with HW flow control
- 2x CAN
- Spektrum DSM / DSM2 / DSM-X® Satellite compatible input
- Futaba S.BUS® compatible input and output
- PPM sum signal
- RSSI (PWM or voltage) input
- I2C®
- SPI
- 3.3 and 6.6V ADC inputs
- External microUSB port

Power System

- Ideal diode controller with automatic failover
- Servo rail high-power (7 V) and high-current ready
- All peripheral outputs over-current protected, all inputs ESD protected

Weight and Dimensions

- Weight: 38g (1.31oz)
- Width: 50mm (1.96")
- Thickness: 15.5mm (.613")
- Length: 81.5mm (3.21")



Raspberry Pi 3 Model B+



Overview



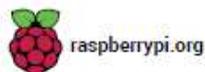
The Raspberry Pi 3 Model B+ is the latest product in the Raspberry Pi 3 range, boasting a 64-bit quad core processor running at 1.4GHz, dual-band 2.4GHz and 5GHz wireless LAN, Bluetooth 4.2/BLE, faster Ethernet, and PoE capability via a separate PoE HAT

The dual-band wireless LAN comes with modular compliance certification, allowing the board to be designed into end products with significantly reduced wireless LAN compliance testing, improving both cost and time to market.

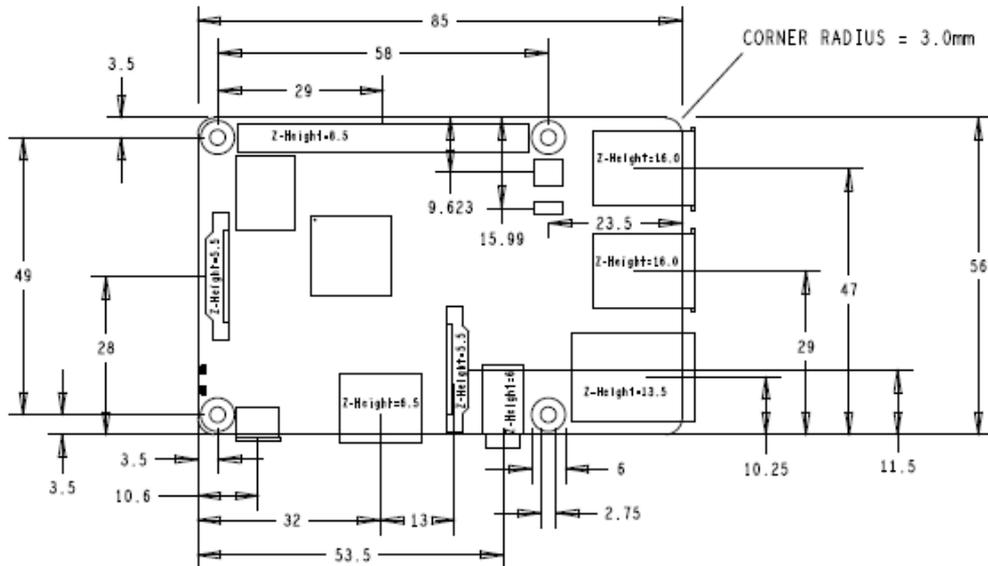
The Raspberry Pi 3 Model B+ maintains the same mechanical footprint as both the Raspberry Pi 2 Model B and the Raspberry Pi 3 Model B.

Specifications

Processor:	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4GHz
Memory:	1GB LPDDR2 SDRAM
Connectivity:	<ul style="list-style-type: none">■ 2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE■ Gigabit Ethernet over USB 2.0 (maximum throughput 300Mbps)■ 4 × USB 2.0 ports
Access:	Extended 40-pin GPIO header
Video & sound:	<ul style="list-style-type: none">■ 1 × full size HDMI■ MIPI DSI display port■ MIPI CSI camera port■ 4 pole stereo output and composite video port
Multimedia:	H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode (1080p30); OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics
SD card support:	Micro SD format for loading operating system and data storage
Input power:	<ul style="list-style-type: none">■ 5V/2.5A DC via micro USB connector■ 5V DC via GPIO header■ Power over Ethernet (PoE)–enabled (requires separate PoE HAT)
Environment:	Operating temperature, 0–50°C
Compliance:	For a full list of local and regional product approvals, please visit www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b+
Production lifetime:	The Raspberry Pi 3 Model B+ will remain in production until at least January 2023.



Physical specifications



Warnings

- This product should only be connected to an external power supply rated at 5V/2.5 A DC. Any external power supply used with the Raspberry Pi 3 Model B+ shall comply with relevant regulations and standards applicable in the country of intended use.
- This product should be operated in a well-ventilated environment and, if used inside a case, the case should not be covered.
- Whilst in use, this product should be placed on a stable, flat, non-conductive surface and should not be contacted by conductive items.
- The connection of incompatible devices to the GPIO connection may affect compliance, result in damage to the unit, and invalidate the warranty.
- All peripherals used with this product should comply with relevant standards for the country of use and be marked accordingly to ensure that safety and performance requirements are met. These articles include but are not limited to keyboards, monitors, and mice when used in conjunction with the Raspberry Pi.
- The cables and connectors of all peripherals used with this product must have adequate insulation so that relevant safety requirements are met.

Safety instructions

To avoid malfunction of or damage to this product, please observe the following:

- Do not expose to water or moisture, or place on a conductive surface whilst in operation.
- Do not expose to heat from any source; the Raspberry Pi 3 Model B+ is designed for reliable operation at normal ambient temperatures.
- Take care whilst handling to avoid mechanical or electrical damage to the printed circuit board and connectors.
- Whilst it is powered, avoid handling the printed circuit board, or only handle it by the edges to minimise the risk of electrostatic discharge damage.





CP2102

SINGLE-CHIP USB TO UART BRIDGE

Single-Chip USB to UART Data Transfer

- Integrated USB transceiver; no external resistors required
- Integrated clock; no external crystal required
- Integrated 1024-Byte EEPROM for vendor ID, product ID, serial number, power descriptor, release number, and product description strings
- On-chip power-on reset circuit
- On-chip voltage regulator: 3.3 V output
- 100% pin and software compatible with CP2101

USB Function Controller

- USB Specification 2.0 compliant; full-speed (12 Mbps)
- USB suspend states supported via SUSPEND pins

Asynchronous Serial Data BUS (UART)

- All handshaking and modem interface signals
- Data formats supported:
 - Data bits: 5, 6, 7, and 8
 - Stop bits: 1, 1.5, and 2
 - Parity: odd, even, mark, space, no parity
- Baud rates: 300 bps to 1 Mbps
- 576 Byte receive buffer; 640 byte transmit buffer
- Hardware or X-On/X-Off handshaking supported
- Event character support
- Line break transmission

Virtual COM Port Device Drivers

- Works with existing COM Port PC applications
- Royalty-free distribution license
- Windows 98 SE/2000/XP
- MAC OS-9
- MAC OS-X
- Linux 2.40 and greater

USBXpress™ Direct Driver Support

Example Applications

- Upgrade of RS-232 legacy devices to USB
- Cellular phone USB interface cable
- PDA USB interface cable
- USB to RS-232 serial adapter

Supply Voltage

- Self-powered: 3.0 to 3.6 V
- USB bus powered: 4.0 to 5.25 V

Package

- Lead free 28-pin MLP (5 x 5 mm)

Ordering Part Number

- CP2102-GM

Temperature Range: -40 to +85 °C

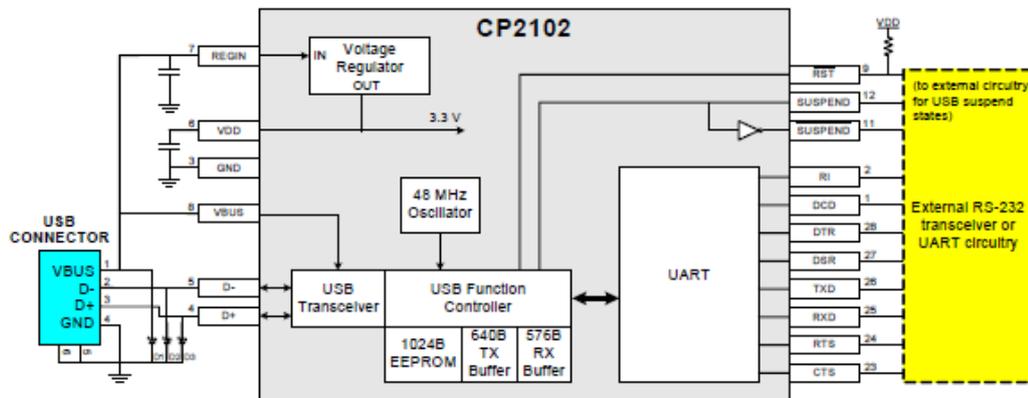


Figure 1. Example System Diagram

2. Absolute Maximum Ratings

Table 1. Absolute Maximum Ratings

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Ambient temperature under bias		-55	—	125	°C
Storage Temperature		-65	—	150	°C
Voltage on any I/O Pin or $\overline{\text{RST}}$ with respect to GND		-0.3	—	5.8	V
Voltage on V_{DD} with respect to GND		-0.3	—	4.2	V
Maximum Total current through V_{DD} and GND		—	—	500	mA
Maximum output current sunk by $\overline{\text{RST}}$ or any I/O pin		—	—	100	mA
Note: Stresses above those listed may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only, and functional operation of the devices at or exceeding the conditions in the operation listings of this specification is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.					

3. Global DC Electrical Characteristics

Table 2. Global DC Electrical Characteristics

$V_{\text{DD}} = 2.7$ to 3.6 V, -40 to $+85$ °C unless otherwise specified.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Supply Voltage		3.0	3.3	3.6	V
Supply Current	$V_{\text{DD}} = 3.3$ V	—	26	—	mA
Supply Current in Suspend	$V_{\text{DD}} = 3.3$ V	—	330	—	μA
Specified Operating Temperature Range		-40	—	+85	°C

Table 3. UART and Suspend I/O DC Electrical Characteristics

$V_{\text{DD}} = 2.7$ to 3.6 V, -40 to $+85$ °C unless otherwise specified.

Parameters	Conditions	Min	Typ	Max	UNITS
Output High Voltage	$I_{\text{OH}} = -3$ mA $I_{\text{OH}} = -10$ μA $I_{\text{OH}} = -10$ mA	$V_{\text{DD}} - 0.7$ $V_{\text{DD}} - 0.1$ —	— — $V_{\text{DD}} - 0.8$	— — —	V
Output Low Voltage	$I_{\text{OL}} = 8.5$ mA $I_{\text{OL}} = 10$ μA $I_{\text{OL}} = 25$ mA	— — —	— — 1.0	0.6 0.1 —	V
Input High Voltage		2.0	—	—	V
Input Low Voltage		—	—	0.8	V
Input Leakage Current		—	25	50	μA

CP2102

4. Pinout and Package Definitions

Table 4. CP2102 Pin Definitions

Name	Pin #	Type	Description
V _{DD}	6	Power In	3.0–3.6 V Power Supply Voltage Input.
		Power Out	3.3 V Voltage Regulator Output. See <PDF link>Section 10.
GND	3		Ground
RST	9	D I/O	Device Reset. Open-drain output of internal POR or V _{DD} monitor. An external source can initiate a system reset by driving this pin low for at least 15 μ s.
REGIN	7	Power In	5 V Regulator Input. This pin is the input to the on-chip voltage regulator.
VBUS	8	D In	VBUS Sense Input. This pin should be connected to the VBUS signal of a USB network. A 5 V signal on this pin indicates a USB network connection.
D+	4	D I/O	USB D+
D-	5	D I/O	USB D-
TXD	26	D Out	Asynchronous data output (UART Transmit)
RXD	25	D In	Asynchronous data input (UART Receive)
CTS	23*	D In	Clear To Send control input (active low)
RTS	24*	D Out	Ready to Send control output (active low)
DSR	27*	D in	Data Set Ready control input (active low)
DTR	28*	D Out	Data Terminal Ready control output (active low)
DCD	1*	D In	Data Carrier Detect control input (active low)
RI	2*	D In	Ring Indicator control input (active low)
SUSPEND	12*	D Out	This pin is driven high when the CP2102 enters the USB suspend state.
$\overline{\text{SUSPEND}}$	11*	D Out	This pin is driven low when the CP2102 enters the USB suspend state.
NC	10, 13–22		These pins should be left unconnected or tied to V _{DD} .

*Note: Pins can be left unconnected when not used.

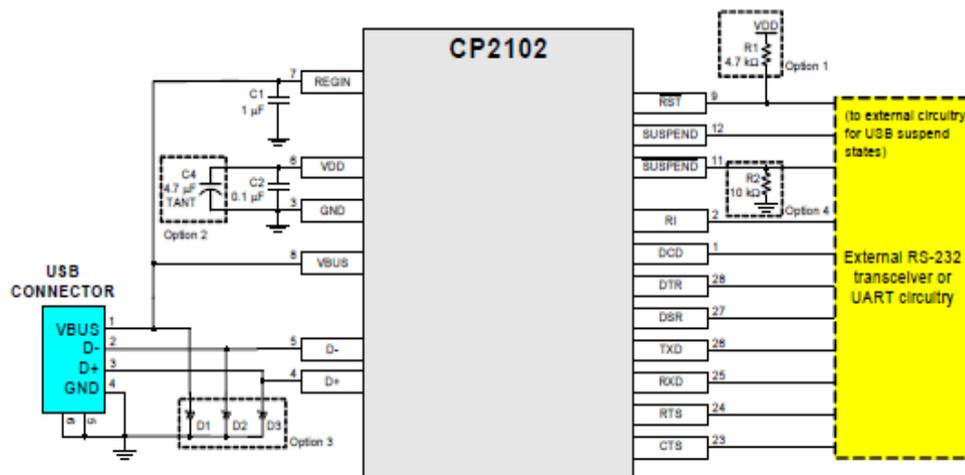
5. USB Function Controller and Transceiver

The Universal Serial Bus function controller in the CP2102 is a USB 2.0 compliant full-speed device with integrated transceiver and on-chip matching and pull-up resistors. The USB function controller manages all data transfers between the USB and the UART as well as command requests generated by the USB host controller and commands for controlling the function of the UART.

The USB Suspend and Resume signals are supported for power management of both the CP2102 device as well as external circuitry. The CP2102 will enter Suspend mode when Suspend signaling is detected on the bus. On entering Suspend mode, the CP2102 asserts the SUSPEND and SUSPEND signals. SUSPEND and SUSPEND are also asserted after a CP2102 reset until device configuration during USB Enumeration is complete.

The CP2102 exits the Suspend mode when any of the following occur: (1) Resume signaling is detected or generated, (2) a USB Reset signal is detected, or (3) a device reset occurs. On exit of Suspend mode, the SUSPEND and SUSPEND signals are de-asserted.

Both SUSPEND and SUSPEND temporarily float high during a CP2102 reset. If this behavior is undesirable, a strong pulldown (10 kΩ) can be used to ensure SUSPEND remains low during reset. See Figure 6 for other recommended options.



- Option 1: A 4.7 kΩ pull-up resistor can be added to increase noise immunity.
- Option 2: A 4.7 μF tantalum capacitor can be added if powering other devices from the on-chip regulator.
- Option 3: Avalanche transient voltage suppression diodes should be added for ESD protection. Use Littelfuse p/n SP0503BAHT or equivalent.
- Option 4: 10 kΩ resistor to ground to hold SUSPEND low on initial power on or device reset.

Figure 6. Typical Connection Diagram

CP2102

6. Asynchronous Serial Data Bus (UART) Interface

The CP2102 UART interface consists of the TX (transmit) and RX (receive) data signals as well as the RTS, CTS, DSR, DTR, DCD, and RI control signals. The UART supports RTS/CTS, DSR/DTR, and X-On/X-Off handshaking.

The UART is programmable to support a variety of data formats and baud rates. The data format and baud rate programmed into the UART is set during COM port configuration on the PC. The data formats and baud rates available are listed in Table 6.

Table 6. Data Formats and Baud Rates

Data Bits	5, 6, 7, and 8
Stop Bits	1, 1.5 ¹ , and 2
Parity Type	None, Even, Odd, Mark, Space
Baud Rates ²	300, 600, 1200, 1800, 2400, 4000, 4800, 7200, 9600, 14400, 16000, 19200, 28800, 38400, 51200, 56000, 57600, 64000, 76800, 115200, 128000, 153600, 230400, 250000, 256000, 460800, 500000, 576000, 921600 ³
Notes:	<ol style="list-style-type: none">1. 5-bit only.2. Additional baud rates are supported. See "AN205".3. 7 or 8 data bits only.

7. Internal EEPROM

The CP2102 includes an internal EEPROM that may be used to customize the USB Vendor ID, Product ID, Product Description String, Power Descriptor, Device Release Number, and Device Serial Number as desired for OEM applications. Customization of the USB configuration data is optional. If the EEPROM is not programmed with OEM data, the default configuration data shown in Table 7 is used. However, a unique serial number is required for OEM applications in which it is possible for multiple CP2102-based devices to be connected to the same PC.

The internal EEPROM is programmed via the USB. This allows the OEM's USB configuration data and serial number to be written to the CP2102 on-board during the manufacturing and testing process. A stand-alone utility for programming the internal EEPROM is available from Silicon Laboratories. A library of routines provided in the form of a Windows[®] DLL is also available. This library can be used to integrate the EEPROM programming step into custom software used by the OEM to streamline testing and serial number management during manufacturing. The EEPROM has a typical endurance of 100,000 write cycles with a data retention of 100 years.

USB descriptors can be locked to prevent future modification.

Table 7. Default USB Configuration Data

Name	Value
Vendor ID	10C4h
Product ID	EA60h
Power Descriptor (Attributes)	80h
Power Descriptor (Max. Power)	32h
Release Number	0100h
Serial Number	0001 (63 characters maximum)
Product Description String	"CP2102 USB to UART Bridge Controller" (126 characters maximum)

8. Virtual Com Port Device Drivers

The CP210x Virtual COM Port (VCP) device drivers allow a CP2102-based device to appear to the PC's application software as an additional COM port (in addition to any existing hardware COM ports). Application software running on the PC accesses the CP2102-based device as it would access a standard hardware COM port. However, actual data transfer between the PC and the CP2102 device is performed over the USB. Therefore, existing COM port applications may be used to transfer data via the USB to the CP2102-based device without modifying the application. Contact Silicon Laboratories for the latest list of supported operating systems.

Note: Silicon Laboratories' VCP device drivers are required for device operation and are only distributed as part of the CP2102 Evaluation Kit (Part Number: CP2102EK). Contact any of Silicon Lab's sales representatives or go to www.silabs.com to order the CP2102 Evaluation Kit. The CP210x drivers and programming utilities are subject to change without notice. Subscription to the website "Auto Email Alert" system for automatic notification of updates and the use of the "Product Update Registration" service is recommended.

9. USBXpress Direct Driver Support

The Silicon Laboratories USBXpress for CP210x Development Kit provides an alternate solution for interfacing with CP210x devices than using the Virtual COM port. No Serial Port protocol expertise is required. Instead, a simple, high-level application program interface (API) is used to provide simpler CP210x connectivity and functionality.

The USBXpress for CP210x Development Kit includes Windows device drivers, Windows device driver installer and uninstallers, and a host interface function library (host API) provided in the form of a Windows Dynamic Link Library (DLL). The included device drivers and installation files support MS Windows 98SE/2000/XP.

10. Voltage Regulator

The CP2102 includes an on-chip 5 to 3 V voltage regulator. This allows the CP2102 to be configured as either a USB bus-powered device or a USB self-powered device. These configurations are shown in Figure 7 and Figure 8. When enabled, the 3 V voltage regulator output appears on the V_{DD} pin and can be used to power external 3 V devices. See Table 8 for the voltage regulator electrical characteristics.

Alternatively, if 3 V power is supplied to the V_{DD} pin, the CP2102 can function as a USB self-powered device with the voltage regulator disabled. For this configuration, it is recommended that the REGIN input be tied to the 3 V net to disable the voltage regulator. This configuration is shown in Figure 9.

The USB max power and power attributes descriptor must match the device power usage and configuration. See application note "AN144: CP210x Customization Guide" for information on how to customize USB descriptors for the CP2102.

Note: It is recommended that additional decoupling capacitance (e.g., 0.1 μ F in parallel with 1.0 μ F) be provided on the REGIN input.

Table 8. Voltage Regulator Electrical Specifications

–40 to +85 °C unless otherwise specified.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Input Voltage Range		4.0	—	5.25	V
Output Voltage	Output Current = 1 to 100 mA*	3.0	3.3	3.6	V
VBUS Detection Input Threshold		1.0	1.8	4.0	V
Bias Current		—	90	—	μ A
*Note: The maximum regulator supply current is 100 mA.					

Anexo D: Resultados de la prueba de normalidad

PRUEBAS

Resumen de procesamiento de casos

PRUEBAS	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
DISTANCIA_RECORRIDA VUELO AU	15	100,0%	0	0,0%	15	100,0%
VUELO CO	15	100,0%	0	0,0%	15	100,0%

Descriptivos

PRUEBAS	Estadístico	Error estándar
DISTANCIA_RECORRIDA VUELO AU	Media	665,4000
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior: 664,5421 Límite superior: 666,2579
	Media recortada al 5%	665,3889
	Mediana	665,0000
	Varianza	2,400
	Desviación estándar	1,54919
	Mínimo	663,00
	Máximo	668,00
	Rango	5,00
	Rango intercuartil	3,00
	Asimetría	,415
	Curtosis	-842
VUELO CO	Media	1349,3333
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior: 1348,5049 Límite superior: 1350,1618
	Media recortada al 5%	1349,3148
	Mediana	1349,0000
	Varianza	2,238
	Desviación estándar	1,49603
	Mínimo	1347,00
	Máximo	1352,00
	Rango	5,00
	Rango intercuartil	1,00
	Asimetría	-,219
	Curtosis	-,352

Pruebas de normalidad

PRUEBAS	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
DISTANCIA_RECORRIDA VUELO AUTO	,202	15	,101	,923	15	,212
VUELO COOPERATIVO	,212	15	,069	,913	15	,152

a. Corrección de significación de Lilliefors

Anexo E: Resultados de la prueba t de Student

➔ Prueba T

Estadísticas de muestras emparejadas

	Media	N	Desviación estándar	Media de error estándar
Par 1 DISTANCIA_RECORRIDA_VUELO_AUTO	665,4000	15	1,54919	,40000
DISTANCIA_RECORRIDA_VUELO_COOPERATIVO	1349,3333	15	1,49603	,38627

Correlaciones de muestras emparejadas

	N	Correlación	Sig.
Par 1 DISTANCIA_RECORRIDA_VUELO_AUTO & DISTANCIA_RECORRIDA_VUELO_COOPERATIVO	15	,000	1,000

Prueba de muestras emparejadas

	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Par 1 DISTANCIA_RECORRIDA_VUELO_AUTO - DISTANCIA_RECORRIDA_VUELO_COOPERATIVO	-683,93333	2,15362	,55606	-685,12597	-682,74070	-1229,956	14	,000