



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIDAD DE GESTIÓN DE  TECNOLOGÍAS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES

CARRERA DE TECNOLOGÍA EN MECÁNICA AERONÁUTICA

MENCIÓN AVIONES

**MONOGRAFÍA: PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
TECNÓLOGO EN MECÁNICA AERONÁUTICA MENCIÓN AVIONES**

**TEMA: FABRICACIÓN DEL MECANISMO DE TRANSFORMACIÓN DEL
SISTEMA DE VUELO DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO DE
DESPEGUE VERTICAL A CONTROL REMOTO PARA LA UNIDAD DE
GESTIÓN DE TECNOLOGÍAS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS ESPE-L**

AUTOR: PAREDES DÍAZ, FRANCISCO JAVIER

DIRECTOR: ING. MUÑOZ GRANDES, MILTON STALIN

LATACUNGA

2020



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES

CARRERA DE TECNOLOGÍA EN MECÁNICA AERONÁUTICA MENCIÓN AVIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que la monografía, ***“FABRICACIÓN DEL MECANISMO DE TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA DE VUELO DE UN VEHÍCULO AEREO NO TRIPULADO DE DESPEGUE VERTICAL A CONTROL REMOTO PARA LA UNIDAD DE GESTIÓN DE TECNOLOGÍAS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L”*** fue realizado por el señor ***Paredes Díaz, Francisco Javier*** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, Enero del 2020

ING. MUÑOZ GRANDES, MILTON STALIN

DIRECTOR DE PROYECTO

C.C.: 0502445547



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES

CARRERA DE TECNOLOGÍA EN MECÁNICA AERONÁUTICA MENCIÓN AVIONES

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, ***Paredes Díaz, Francisco Javier***, declaro que el contenido, ideas y criterios de la monografía: ***Fabricación del mecanismo de transformación del sistema de vuelo de un vehículo aéreo no tripulado de despegue vertical a control remoto para la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, Enero del 2020

PAREDES DÍAZ, FRANCISCO JAVIER

C.C.: 1719299412



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

iii

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES

CARRERA DE TECNOLOGÍA EN MECÁNICA AERONÁUTICA MENCIÓN AVIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, ***Paredes Díaz, Francisco Javier*** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar la monografía: ***Fabricación del mecanismo de transformación del sistema de vuelo de un vehículo aéreo no tripulado de despegue vertical a control remoto para la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterio son de mi responsabilidad.

Latacunga, Enero del 2020

PAREDES DÍAZ, FRANCISCO JAVIER

C.C.: 1719299412

DEDICATORIA

Para mi familia que me ha guiado y ha hecho todo lo posible para llegar a ser un hombre preparado y capaz de cumplir con los sueños y objetivos planteados.

Para mi madre, Lourdes Díaz, que me enseñó a hacer las cosas con amor y dedicación y que me ha ayudado y acompañado todos los días y noches, siempre incentivandome a seguir adelante y nunca rendirme a pesar de todos los inconvenientes que se han presentado.

Para mi padre, Rodrigo Paredes, un ejemplo digno de seguir, que con sus consejos y experiencia me ha enseñado a ser una persona de bien para la sociedad, que me ha apoyado económica y moralmente para ser un buen profesional, persona e hijo.

A mi hermano, Jonathan Paredes, que me ayudo a distraerme en momentos de estrés y me incentivo a seguir en la vida aeronáutica.

A mi abuelita, Margarita Escalante, que siempre ha estado conmigo en todos los momentos importantes, por la dedicación y paciencia que ha tenido conmigo y toda mi familia.

PAREDES DÍAZ, FRANCISCO JAVIER

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme tener la oportunidad de estudiar y ser un profesional, por la salud y la familia que me dio.

Agradezco a mi familia por todo el esfuerzo que han hecho, por guiarme, prepararme, enseñarme valores y ayudarme en cada paso que he dado.

De igual manera, agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas por transmitir todos los conocimientos y por acogermme como segundo hogar en mi trayectoria universitaria.

Al docente Gabriel Inca, que me enseñó mucho sobre electrónica de aviación y me inspiró a seguir en este camino.

Al docente Milton Muñoz que me ha guiado, corregido e incentivando en el desarrollo del proyecto de titulación.

Al docente Rodrigo Bautista por su tutela durante toda mi vida universitaria.

A los docentes: Samantha Zabala, Jonathan Zurita, Paul Arcos, Andrés Arévalo, Andrés Arellano y a todos los que han transmitido su conocimiento de forma adecuada.

PAREDES DÍAZ, FRANCISCO JAVIER

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Planteamiento del problema.....	2
1.3	Justificación.....	4
1.4	Objetivos.....	5
1.4.1	Objetivo general.....	5

1.4.2	Objetivos específicos.....	6
1.5	Alcance.....	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1	Mecanismo electrónico.....	7
2.2	Aeronaves.....	8
2.3	Aeronaves con aterrizaje y despegue vertical (VTOL).....	9
2.3.1	Bell XV-15.....	10
2.3.2	V-22 Osprey.....	11
2.4	Ventajas y desventajas.....	12
2.5	Uso de las aeronaves con despegue y aterrizaje vertical.....	14
2.6	Aeronaves a control remoto.....	16
2.7	Componentes.....	19
2.7.1	Motores sin escobillas (brushless).....	19
2.7.2	Controlador de velocidad electrónico (ESC).....	23
2.7.3	Tarjeta distribuidora de energía (PDB).....	27
2.7.4	Computadora de vuelo.....	27
a.	KK2.1.....	27
b.	Pixhawk 2.4.8.....	29
2.7.5	Hélices.....	31
2.7.6	Cuadro o Aeronave a escala.....	33

		viii
2.7.7	Receptor.	35
2.7.8	Transmisor.	37
2.7.9	Batería de polímero de litio.	38
2.7.10	Servos.	40
2.8	Tipos de VTOL a control remoto.	42
2.8.1.	Decisión de diseño.	45

CAPÍTULO III

DESARROLLO

3.1.	Preliminares.	48
3.1.1	Consumo energético motores sin escobillas.	48
3.1.2	Consumo energético servos.	50
3.1.3	Consumo energético total.	52
3.2.	Diagrama eléctrico de bloque.	54
3.3.	Construcción del aeroplano.	56
3.3.1.	Material.	56
3.3.2.	Aeronave.	58
3.3.3.	Materiales electrónicos.	59
3.3.4.	Planificación de construcción.	61
3.3.5.	Construcción del modelo.	62
3.3.6.	Implementación de los componentes electrónicos.	65
a.	Controlador de vuelo.	65

b.	Batería.	67
c.	Motores de levante y controladores de velocidad electrónicos.	68
d.	Configuración de la computadora de vuelo de la aeronave de despegue y aterrizaje vertical.	69
e.	Sistema de transición de vuelo y servos.	73
f.	Servos.	73
3.4	Pruebas.	75
3.4.1	Prueba en modo tricóptero.	75
3.4.2	Prueba en modo avión.	77
3.4.3	Transición modo tricóptero a avión.	78
3.4.4	Peso total de la aeronave.	80

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.	Conclusiones.	81
4.2.	Recomendaciones.	82

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	83
---	-----------

GLOSARIO DE TÉRMINOS.	83
-----------------------------------	-----------

ANEXOS.	90
---------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferencia de fuerzas aerodinámicas.....	3
Figura 2. Aeronave a control remoto.	8
Figura 3. Boeing X-32.....	9
Figura 4. Bell XV-15.....	11
Figura 5. Bell Boeing V-22 Osprey.	12
Figura 6. Métodos de topografía.....	15
Figura 7. V-22 Osprey.	15
Figura 8. Control FlySky.	16
Figura 9. Avión eléctrico.	17
Figura 10. Motores a Combustión.....	19
Figura 11. Numeración motor Brushless.	21
Figura 12. Motor eléctrico.	22
Figura 13. Dimensiones Motor rocket 2212 1000 KV.	23
Figura 14. ESC.	25
Figura 15. Tabla de desempeño de los motores.....	25
Figura 16. ESC 20 A.....	26
Figura 17. Tarjeta de energía	27
Figura 18. KK2.1	29
Figura 19. Pixhawk 2.4.8.	31
Figura 20. Hélices.....	33
Figura 21. Cuadro de dron.....	34
Figura 22. Receptor.	37

Figura 23. Radio control.	38
Figura 24. Batería LiPo.	40
Figura 25. Servo.	42
Figura 26. Convertiplano.	43
Figura 27. Tricóptero VTOL.	44
Figura 28. VTOL Híbrido.	45
Figura 29. Diagrama de bloque.	55
Figura 30. Pines de conexión pixhawk.	55
Figura 31. Foam Board.	57
Figura 32. Avión Explorer VTOL.	59
Figura 33. Flujograma de construcción.	61
Figura 34. Planos de construcción.	62
Figura 35. Planos cortados.	62
Figura 36. Fuselaje y sección de cola.	63
Figura 37. Montantes del motor.	64
Figura 38. Aeronave terminada.	64
Figura 39. Pixhawk 2.4.8.	67
Figura 40. Implementación motores.	68
Figura 41. Configuración VTOL.	69
Figura 42. Configuración de sensores.	70
Figura 43. Configuración VTOL.	72
Figura 44. Mecanismo de rotación.	73
Figura 45. Implementación servos.	74

	xii
Figura 46. Prueba modo dron.....	76
Figura 47. Prueba modo avión.....	78
Figura 48. Peso del modelo.	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Resumen de selección de construcción de vtol</i>	47
Tabla 2. <i>Resumen consumo energético de la aeronave</i>	54
Tabla 3. <i>Resumen de componentes electrónicos</i>	60
Tabla 4. <i>Puertos de conexión de los motores de levante modo tricóptero</i>	66
Tabla 5. <i>Parámetros de configuración VTOL</i>	71
Tabla 6. <i>Puertos de conexión modo avión</i>	74
Tabla 7. <i>Fallas y soluciones modo Drone</i>	76
Tabla 8. <i>Fallas y soluciones modo avión</i>	77
Tabla 9. <i>Fallas y soluciones transición de modo de vuelo</i>	79

RESUMEN

El siguiente proyecto es sobre **aeronaves de despegue y aterrizaje vertical (VTOL)**, esta dividido en cuatro capítulos en los cuales se describe la investigación y los pasos de diseño y construcción de un **prototipo** para la universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, en la primera sección, planteamiento del problema, están escritos todos los antecedentes que guiaron la investigación en conjunto con la justificación y objetivos del proyecto, la segunda parte, sección marco teórico, la información descrita fue basada en documentación técnica y trabajos investigativos así como de conocimiento recopilado de distintas fuentes que ayudaran al lector a entender de manera general, todos los elementos usados en la construcción y su funcionamiento en la aeronave, así como, la historia detrás de las aeronaves de despegue y aterrizaje vertical, en este capítulo están descritos los diferentes modelos que pueden ser construidos y la decisión de diseño basado en las ventajas y desventajas de los diferentes aviones de **aeromodelismo** que fueron tomados como ejemplo. La tercera sección muestra todos los detalles de la construcción y proceso de operación de la aeronave en conjunto con todos los datos que respaldan la investigación y el correcto funcionamiento del VTOL, en la cuarta y última sección, se encuentra el resultado de la investigación y pruebas que se hicieron a la aeronave, así como, recomendaciones para la correcta preservación del modelo.

PALABRAS CLAVE:

- **AERONAVES - DESPEGUE Y ATERRIZAJE VERTICAL (VTOL)**
- **DRONES - PROTOTIPOS**
- **AEROMODELISMO**

ABSTRACT

The present research is about **vertical take-off and landing (VTOL)** aircrafts, is divided in four chapters in which are described the investigation and steps of the design and construction of one **prototype** for the Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, in the first section, problem statement, are written all the background that led the investigation along with the justification and the objectives of the research, the second part, theoretical section, the information was based in previous papers and documentation as well as knowledge collected from different sources that help the reader to understand, in a general manner, all the elements that were used in the building and its functional part in the airplane and the history behind the model and VTOL aircrafts, in this chapter are described the different types of models that can be constructed and the decision of design based in advantages and disadvantages of the different kind of **aeromodelling** airplanes that were took as model. The third section shows all details about the building and the operating process of the aircraft along with all the data that supports the research and the correct functioning of the VTOL, in the fourth section we can find the result of the investigation, the test that were made to the aircraft and recommendations for the correct preservation of the model.

KEY WORDS:

- **VERTICAL TAKE OFF AND LANDING (VTOL)**
- **DRONE - PROTOTYPE**
- **AEROMODELLING**

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes.

Existen aeronaves que tienen la capacidad de realizar su despegue de manera vertical gracias a los avances de la tecnología, en este caso podemos evidenciar aeronaves militares que están consideradas en este grupo debido a su rango de ascenso superior al de una aeronave convencional; mecanismos de cambio de posición de motores han sido evidenciados a lo largo de la historia en varios modelos de aerodinámicos como por ejemplo el Bell XV-15, el cual es una aeronave de fabricación Estadounidense con características convertiplano (cambio de posición del ángulo de los motores) y el primero en su tipo que estatuyó la factibilidad práctica de un concepto que combina las características y facilidades del despegue vertical con las ventajas del vuelo de una aeronave regular que ha sido construida y probada.

Según George Lehberger, “el uso común de las aeronaves ha sido restringido a un lugar extenso principalmente por el hecho de espacio considerable necesario para despegar dichas máquinas” (1930). Por tal razón ingenieros aeronáuticos han estado diseñando aeroplanos con características de despegue vertical por casi 90 años dando resultados positivos y alentadores, no obstante muchos se han quedado en solo proyectos a excepción de varios modelos como por ejemplo: Bell

XV-15 y V-22 Osprey los cuales demuestran que el prototipo de despegue vertical puede ser elaborado.

El mayor desafío para el ingeniero aeronáutico y pionero en la investigación de aeronaves de despegue y aterrizaje vertical a control remoto Tom Stanton (2018) para el diseño de un mecanismo de cambio de sistema de vuelo “flotante” a “normal” es “la disminución de sustentación durante el cambio de posición de los motores y los controles de vuelo durante esta operación”. Es necesario un estudio sobre el punto de equilibrio o centro de gravedad de la aeronave para evitar que esta obtenga una invariabilidad de los empujes proporcionados por cada motor y así sostener al convertiplano en vuelo estable durante la conversión de modo de operación.

1.2 Planteamiento del problema.

Numerosos modelos y tipos de aeronaves existen alrededor del mundo, considerando conocimientos básicos impartidos en la Unidad de Gestión de Tecnologías (UGT) sobre aeroplanos convencionales se han obviado diseños tales como los aviones de despegue vertical que pueden ser una fuente de trabajo a futuro.

Las fuerzas aerodinámicas existentes en el modelo propuesto se pueden evidenciar de dos maneras, en primer lugar gracias a su posibilidad de ascenso vertical (sustentación y empuje arriba) y el cambio de modo de vuelo a una aeronave convencional. Las fuerzas aerodinámicas son usualmente explicadas

mediante imágenes, sin embargo, la atención requerida para entender este tipo de conceptos básicos de aviación se obtiene mediante la práctica, generalmente con una aeronave mas pesada que el aire capaz de sustentarse en la atmósfera gracias a sus propios medios, es decir, aerodino, a escala que simulará lo que sucede en un vuelo real.

Con este proyecto se busca implementar enseñanzas prácticas a través del uso de aeronaves a control remoto con motores eléctricos ya que en la Unidad de Gestión de Tecnologías solo encontramos aeromodelos con motores recíprocos o JET que funcionan con combustible nitro los cuales tienen muchas desventajas respecto al costo de operación y el espacio de uso, así, estudiantes podrán observar y aprender sobre principios aerodinámicos básicos, aeromodelismo y aviación en general mediante la práctica sin necesidad de buscar un espacio realmente grande para el funcionamiento de este dispositivo de despegue vertical, de igual manera, la carrera de Mecánica Aeronáutica y el club de aeromodelismo contarán con un aeromodelo totalmente distinto a los usuales.

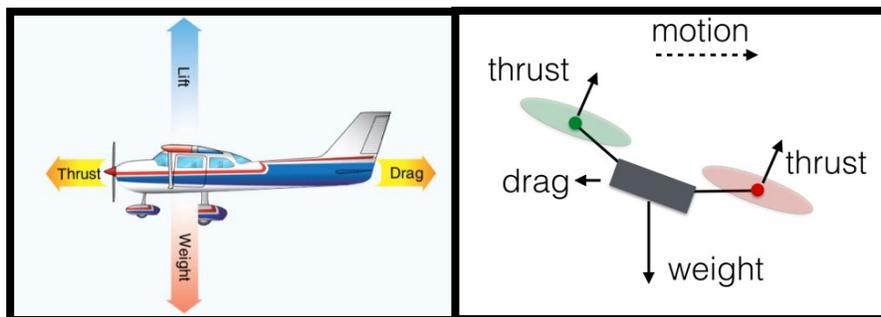


Figura 1. Diferencia de fuerzas aerodinámicas.

Fuente: (Federal Aviation Administration)

De no solucionarse el problema los estudiantes y docentes de la Unidad de Gestión de Tecnologías no contarán con un avión eléctrico con características convertiplano para entender de forma adecuada las fuerzas aerodinámicas elementales que se encuentran en todas las aeronaves (Aeronaves de despegue vertical, aeronaves convencionales, helicópteros, entre otros), no contarán con diseños de aeromodelismo distintos a los usuales, de igual manera se puede observar el diseño de la aeronave y estará a la disposición de estudiantes y docentes que conforman la Unidad de Gestión de Tecnologías.

1.3 Justificación.

El espacio para las aeronaves a control remoto con motor que funciona con combustible nitro existentes en la Unidad de Gestión de Tecnologías es escaso para realizar prácticas con dichos dispositivos, por tal razón se pretende elaborar un mecanismo con motores electrónicos (brushless) que no necesita de una extensa longitud de terreno para su despegue como la aeronave a escala de ascenso vertical propuesto, de igual manera se podrá evidenciar mediante esta práctica las fuerzas aerodinámicas que actúan en un vuelo convencional de aeronave, tricóptero y un tipo de avión a control remoto (RC) totalmente distinto a los que encontramos en la Unidad de Gestión de Tecnologías.

Los conocimientos sobre el uso de la aeronave serán redactados en el documento de proyecto para que las personas que quieran usar este dispositivo lo puedan realizar correctamente, el aeroplano se usará de forma práctica en la

enseñanza de fuerzas aerodinámicas y principios de vuelo en general para el entendimiento óptimo de los estudiantes de la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” y se usará, de igual manera, para instrucción en el club de aeromodelismo de la Unidad de Gestión de Tecnologías.

Llevar la teoría a la práctica es uno de los desafíos más importantes en la enseñanza de cualquier doctrina, desde aeronáutica hasta medicina, para que así los futuros profesionales puedan aplicar de forma adecuada lo aprendido durante su trayectoria universitaria, en muchos lugares la falta de herramientas hace que la teoría se vuelva base fundamental de aprendizaje, por tal razón es de suma importancia que se enseñe a los estudiantes con ejemplos prácticos como con la aeronave de ascenso vertical a control remoto.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Elaborar un mecanismo electrónico de transformación de sistema de vuelo flotante a normal para una aeronave de ascenso vertical mediante el cambio de operación en los motores eléctricos para la enseñanza en la Unidad de Gestión de Tecnologías.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Investigar sobre los tipos de aeronaves de despegue vertical existentes para evaluar los distintos modos de construcción mediante tablas de comparación.
- Ensamblar el mecanismo electrónico de la aeronave de acuerdo al tipo de construcción más conveniente.
- Comprobar los modos de vuelo de la aeronave de despegue vertical mediante el uso de una computadora de vuelo y la realización de pruebas prácticas en tierra.

1.5 Alcance.

Con este proyecto se busca la posibilidad de que estudiantes puedan agregar mecanismos distintos a la aeronave de despegue vertical tales como: Vista en Primera Persona (FPV), cámaras, rociadores de líquidos, entre otros, para la ayuda en varios campos de estudio dentro del mundo de los aviones híbridos como: medición de áreas de terrenos, entrega de componentes, temas de estudio, aeromodelismo profesional, fotografía, entre otros, y puedan tener un conocimiento adicional en el mundo del modelismo de aeronaves y aplicarlo dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Mecanismo electrónico.

Para que la aeronave de despegue vertical propuesta funcione es necesario que todos los componentes electrónicos interactúen entre sí para formar una armonía en los circuitos y poder realizar el cambio de modo de vuelo de “flotante” a “normal”, para realizar esta acción se debe tener una computadora de vuelo especial instalada con un software en ella que permitirá que los demás elementos del avión interactúen de forma adecuada entre ellos al momento del cambio de energía en los motores. Un mecanismo es el “conjunto de las partes de una máquina en su disposición adecuada” (Real Academia Española , 2018).

En la definición de mecanismo obtenida de la Real Academia Española encontramos la interpretación adecuada para el término, como en toda aeronave, ya sea electrónica o mecánica los componentes deben estar en su ubicación exacta puesto que si uno se encuentra fuera de lugar podría causar una gran falla a los demás y a la aeronave, en este proyecto se investigó a cabalidad los elementos electrónicos que conformarán al avión de despegue vertical, su interrelación y ubicación apropiada en la estructura para que funcione de forma adecuada.

2.2 Aeronaves.

Las aeronaves fueron creadas gracias al vuelo de las aves, esta ciencia se remonta cientos de años atrás cuando los humanos intentaban recrear dicha acción inventando mecanismos para poder volar al igual que estas, el primer vuelo registrado de un avión mas pesado que el aire fue el de los hermanos Wright en 1903 el cual alcanzó una distancia de 37 metros en 12 segundos, desde ese momento la aviación fue desarrollándose por completo hasta la creación de máquinas complejas que alcanzan vuelos interoceánicos, velocidad del sonido y autonomías que de seguro en ese entonces no se imaginaban, una aeronave se define en la actualidad como “toda máquina que puede sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra” (Dirección General de Aviación Civil , 2010).

La aeronave de despegue vertical que se construirá se incorpora a este significado ya que será más pesada que el aire y tendrá motores para impulsarla en la atmósfera, es de suma importancia destacar este término para entender el funcionamiento del avión y su origen.



Figura 2. Aeronave a control remoto.
Fuente: (FLITE TEST, 2015)

2.3 Aeronaves con aterrizaje y despegue vertical (VTOL).

Las aeronaves VTOL (Vertical Take Off and Landing) de despegue y aterrizaje vertical se caracterizan por tener la capacidad de elevarse en poca superficie maniobrando al avión de forma perpendicular al piso para posteriormente cambiar el modo de vuelo a recto y nivelado usando un método de propulsión horizontal a través del cambio de posición de los motores, los helicópteros, dirigibles y globos no son denominados VTOL ya que estos se mueven en el plano vertical y no realizan ningún tipo de cambio en los mecanismo para sus vuelos horizontales, los VTOL se encuentran dentro de la clasificación de los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV).

El auge de este tipo de aviones surgió después de la segunda guerra mundial, cuando los militares americanos observaron la funcionalidad de los cazas al cargar municiones, despegar y aterrizar en lugares relativamente cortos, las aeronaves con estas características más reconocidas son: Rían X-13 Vertijet, Boeing X-32, Lockheed Martin F-32, entre otros. Sin embargo en aviación de transporte se destacaron dos tipos de VTOL con características convertiplano que se describirán a continuación:



Figura 3. Boeing X-32.
Fuente: (BOEING, 2000)

2.3.1 Bell XV-15.

Es una aeronave construida por la NASA en conjunto con la compañía Bell el cual inicio su fabricación en 1973 bajo el concepto de “pruebas”, es una aeronave que quería conseguir la capacidad de despegue vertical o corto y las ventajas de vuelo crucero a velocidades altas, esta aeronave con características convertiplano fue impulsada con dos motores turbo eje Lycoming T-53 que llevan una hélice de 3 palas de 25 ft (pies) de longitud y están conectados entre sí a través de un eje para que el movimiento de los motores sea uniforme, este se encuentra en los naceles de las puntas del ala para minimizar las cargas operacionales en el sistema que se mueve como una sola unidad.

Para el despegue los rotores, motores y ejes se encuentran en forma perpendicular al suelo de manera vertical donde el empuje es dirigido hacia el suelo de tal manera la aeronave se levanta como helicóptero ascendiendo de manera vertical, en este modo la aeronave tiene una autonomía de una hora. Una vez en el aire la aeronave puede seguir con su vuelo de dos maneras distintas, en modo flotante y en modo aeronave, el cambio se logra gracias a la conversión del ángulo de los motores paulatinamente, este dura de 10 a 15 segundos y la sustentación obtenida por las hélices del motor se transfiere a las alas, para el aterrizaje los motores cambian de posición y se puede realizar de manera vertical.



Figura 4. Bell XV-15.
Fuente: (NASA, 1981)

2.3.2 V-22 Osprey.

El Bell Boeing V-22 Osprey es el primer convertiplano construido en producción alrededor del mundo, al igual que el modelo Bell XV-15 esta combina la capacidad de despegue vertical con la sustentación producida en los motores en esta posición y la velocidad, rango, resistencia y maniobrabilidad de una aeronave con los motores ubicados horizontalmente. Este modelo es usado en la aviación naval de los Estados Unidos de Norteamérica por su flexibilidad y alcance operacional, se los asigna a misiones anteriormente denominadas imposibles por la falta de espacio en el despegue y aterrizaje.

Fue diseñado y construido por Boeing y Bell a inicios de 1980, tuvo su primer vuelo el 19 de marzo de 1989 y fue introducido al mercado en Junio de 2007 después de superar pruebas prácticas y cambios en su diseño inédito, este se originó a partir del programa aeronáutico del servicio conjunto experimental de despegue y aterrizaje vertical (*joint – service Vertical Take off/ landing Experimental*) del departamento de defensa de los Estados Unidos, el avión

puede usarse como despegue totalmente vertical con los motores perpendiculares al suelo con un ángulo de 90 grados o despegues cortos con los motores ubicados en un ángulo de 45 grados que disminuirá la carrera de partida del mismo, cabe recalcar que un 43% de la estructura de esta aeronave esta formada por materiales compuestos por ser livianos, una capacidad necesaria para que este pueda subir de forma vertical y mantenerse en modo flotante.



Figura 5. Bell Boeing V-22 Osprey.
Fuente: (Bell, 2017)

2.4 Ventajas y desventajas.

En la construcción de aeronaves de despegue vertical se deben tomar en cuenta muchas posibilidades y tipos de ensamblaje para que no termine en desastre, el cálculo de centro gravedad debe ser específico para que la aeronave no sufra un desbalance durante la carrera de despegue y el cambio en el modo de vuelo, a continuación se detallaran las ventajas y desventajas de este tipo de aeronaves:

Ventajas

- Despegue y aterrizaje en pistas cortas o en lugares abiertos sin aeropuertos

- Considerable aumento en carga
- Mayor flexibilidad de uso
- Diseño innovador
- Vuelo estático
- Progreso en la tecnología
- Uso en misiones catalogadas imposibles
- Patrullaje de fronteras
- Búsqueda y rescate
- Vigilancia

Desventajas

- Mayor consumo de combustible
- Mayor complejidad del diseño
- Pocas Aeronaves en uso
- Mantenimiento exhaustivo
- Peligro superior en vuelo
- Tamaño de construcción pequeño
- Mayor periodo de prueba antes de empezar a usarlo

Dentro del mundo de la aviación no se han desarrollado aeronaves comerciales con características de despegue y aterrizaje vertical por su gran peligro en vuelo y su tamaño relativamente pequeño que no generaría ningún tipo de ganancia para las aerolíneas del mundo, sin embargo, en aplicaciones militares se usa regularmente por su gran flexibilidad, cabe recalcar que el diseño del Bell Boeing V-22 Osprey es relativamente nuevo y fue sacado al mercado después de casi 30 años de investigación, se espera que en los próximos años sigan apareciendo aviones con propiedades VTOL.

2.5 Uso de las aeronaves con despegue y aterrizaje vertical.

Al tener la capacidad de despegue y aterrizaje vertical los VTOL son usados en muchas aplicaciones y disminuyen costos en las empresas, el uso de este tipo de aeronaves dentro del Ecuador se destaca en la topografía, en dicho campo, métodos de medición antiguos fueron y son usados actualmente, sin embargo con un vehículo aéreo no tripulado de estas características la disminución del tiempo y el aumento en la cantidad de hectáreas recolectadas es significativo, se usan drones para esta aplicación pero la limitación de su uso radica en la energía que este puede consumir durante su trayecto, por otro lado aviones con ala fija necesitan de una pista grande para aterrizar y poder hacer el mapeo topográfico de una sección, en este caso el VTOL eléctrico une las ventajas de un dron y la movilidad de una aeronave a control remoto siendo el modo mas eficaz en este campo.

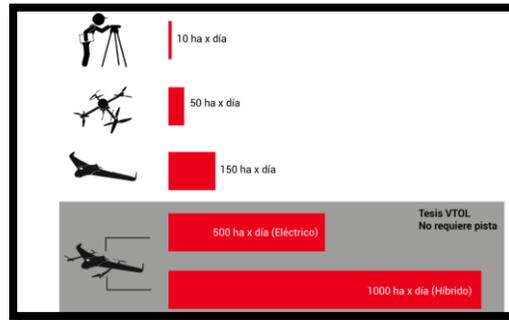


Figura 6. Métodos de topografía.
Fuente: (Barzallo, 2018)

El gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica usa esta configuración para aeronaves de la marina que están destinadas a misiones que anteriormente eran catalogadas imposibles por la falta de espacio que existía para el aterrizaje de aviones pesados en un sitio específico, como ejemplo podemos tomar el Bell Boeing V-22 Osprey el cual fue diseñado para este tipo de trabajos. Según el sitio web Forbes esta aeronave es catalogada como “la mas exitosa en sistemas de nuevos combates desde el 9/ 11” (Thompson, 2017).



Figura 7. V-22 Osprey.
Fuente: (Bell, 2017)

El uso de aeronaves con características de despegue y aterrizaje vertical también puede ser visualizado en aplicaciones como fotografía y vigilancia de fronteras, cabe recalcar que para cada uno de los usos de este tipo de UAV's existe una

configuración especial en el diseño y los elementos que caracterizaran a la utilización y desempeño en su campo.

2.6 Aeronaves a control remoto.

El control remoto es un dispositivo que se usa para realizar una acción en un cierto tipo de máquina estando lejos de la misma, funciona a través de frecuencias y el elemento al cual se desea dominar debe estar sincronizado a la misma para así obtener un enlace entre ellos y que otros dispositivos cercanos no repitan la acción. Las aeronaves a control remoto cuentan con un receptor de acuerdo al tipo de transmisor, este responderá a todas las acciones que se envían en una frecuencia usual de 2,4 GHz, usados en aeromodelismo, este nace años antes de que la aviación surja y se centra en la fabricación de modelos de aeroplanos que puedan sustentarse en la atmosfera, al principio solo se hacían modelos que planeaban en el aire, desde 1939 empezaron a crearse modelos a escala con motores y radio control, en la actualidad se pueden fabricar con materiales desde madera hasta foam board, estos pueden tener una fuente de movimiento eléctrica o mecánica con motores brushless o a combustión.



Figura 8. Control FlySky.
Fuente: (FlySky, 2018)

2.6.1 Aeronaves con motor Eléctrico.

Las aeronaves que usan motores eléctricos son muy populares ya que no necesitan una fuente de combustible fósil como para los modelos con motor a combustión, estos se caracterizan por tener motores que operan con corriente continua y su fuente de alimentación es una batería LiPo, el motor eléctrico se caracteriza por la cantidad de Kilovoltios (KV) que posee, el término mencionado anteriormente se refiere al número de revoluciones que posee cada propulsor en relación al voltaje proporcionado.

La particularidad para este tipo de modelos es que los materiales para su construcción deben ser muy livianos, por ejemplo espuma, espuma Flex, fibra de carbono o plástico, entre otros, para que el motor pueda propulsar a la aeronave por el aire, este usa componentes adicionales como controladores de velocidad electrónicos (ESC's) y un cierto tipo de hélice adecuado al número de KV y tipo de motor eléctrico, entre otros elementos que serán descritos posteriormente en este documento.



Figura 9. Avión eléctrico.
Fuente: (Pinterest, 2019)

2.6.2 Aeronaves con motor a Combustión.

El aeromodelismo es un deporte que se destaca por su alto componente científico, técnico y social, en muchos lugares del mundo se realiza este tipo actividad dentro de clubes tanto como para entretenimiento como para competencia, se basa en la representación de un cierto tipo de aeronave a escala, muchas veces solo se desea recrear modelos ya existentes, sin embargo ingenieros aeronáuticos aficionados y profesionales buscan mediante proyectos en esta área plasmar sus propias creaciones y verlas volar.

En la sección de motores a combustión podemos destacar dos tipos: motor de combustión interna y motor turborreactor JET, el primero funciona al igual que un motor recíproco, este puede ser de uno o mas cilindros dependiendo de su configuración, a través de la combustión de un carburante se mueve un pistón que a su vez acciona la hélice para proporcionar el empuje necesario, existe una clasificación de los motores recíprocos para aeromodelismo: glow plug, diésel y chispa, por otro lado el motor turborreactor se basa en un modelo a escala de un real, este tipo de propulsor miniatura realiza el mismo sonido ensordecedor que uno usado en aviación comercial y puede alcanzar velocidades de hasta 400 km/h, la desventaja de los motores que funcionan a base de combustible es que el piloto que los maneja debe ser experimentado, de otra manera un choque podría destruir al avión que en su mayoría son hechos de madera de balsa en combinación con materiales compuestos.



Figura 10. Motores a Combustión.

Fuente: (Pinterest, 2019)

2.7 Componentes.

La aeronave que se construirá debe estar formada por muchos elementos que funcionan en conjunto para formar un mecanismo, si uno de estos falta el avión de despegue vertical no funcionará de manera adecuada, a continuación se detallarán los componentes del mismo:

2.7.1 Motores sin escobillas (brushless).

Existe una gran cantidad de motores eléctricos para drones y aviones manejados a control remoto, el uso de los motores depende de la aplicación que se le va a dar al dispositivo volador, la cantidad de horas de vuelo, la velocidad y el empuje necesario. Para el modelo de despegue y aterrizaje vertical VTOL que se construirá es necesario el uso del tipo de motor eléctrico sin escobillas (brushless), este término se refiere a que no tiene una parte física que haga contacto con el rotor del mismo, los motores con escobillas suelen tener un par de anillos rodantes que disminuye el rendimiento, desprenden calor y producen ruidos, estos se usan en juguetes pequeños y se dañan mucho mas rápido.

Los motores brushless funcionan con una corriente eléctrica suministrada por una batería de polímero de litio - LiPo hacia las bobinas que se encuentran en el estator, estas generan campos magnéticos que hacen que se mueva la parte del rotor y transmitir ese movimiento a la hélice, el uso de magnetismo lo hace ser mas eficiente, durable y el mantenimiento a los mismos es mucho menos complicados que los motores con escobillas. La conmutación de los campos magnéticos se genera gracias a los controladores de velocidad electrónicos de los cuales se hablará más a detalle posteriormente.

Los motores brushless tienen 3 cables que necesariamente deben ser conectados a un controlador de velocidad electrónico - ESC, si se lo enlaza de forma directa a una batería puede generar un corto circuito en cualquiera de los dos componentes y estropearlos. Cada motor eléctrico tiene una numeración que especifica el diámetro, la altura y las revoluciones por voltios aplicada al mismo. De acuerdo a la marca usualmente se caracterizan por empezar con una serie de letras seguido de cuatro números, los dos primeros simbolizan el diámetro del estator del motor en milímetros, los dos siguientes dígitos significan la altura del estator en milímetros, al momento de elegir los motores que usaremos debemos tener mucho cuidado porque algunos fabricantes se refieren al diámetro y altura exterior del motor eléctrico, las medidas no son estandarizadas, por último encontramos una serie de 4 números seguidos de la abreviatura KV y se refiere a las revoluciones

por voltio aplicado en un minuto, este número es teórico ya que se toma cuando el motor se encuentra sin hélice y no soporta su propio peso.



Figura 11. Numeración motor Brushless.

Fuente: (Dronpedia, 2015)

Mientras mas elevado sea el número de kilovoltios el motor será mas pequeño y girará mas rápido, un motor eléctrico con menor numero de KV girará mas despacio pero tendrá un torque mayor lo que significa que puede levantar mas peso pero a una velocidad menor, esto depende de las dimensiones de la hélice, por ejemplo, si a un motor con mayor voltaje se lo configura con una hélice pequeña generará un cierto impulso, si a un motor de menor voltaje se lo configura con la misma hélice por obvias razones no obtendrá el mismo empuje al ser mas lento, la diferencia radica en que los motores con mayor porcentaje de kilovoltios pueden cargar con hélices de mayores dimensiones y por lo tanto generar mas empuje al producir mas aire.

Los motores brushless no tienen sentido de rotación por tal razón es necesario probarlos antes de instalarlos y cambiar el sentido de los cables de ser preciso,

algunas marcas tienen roscas que se ajustan al mover el sujetador de la hélice en sentido horario y otros en sentido anti horario, debemos darnos cuenta de este pequeño detalle para que el movimiento no desajuste la hélice y pueda causar un desastre. Para instalar los motores se deben tomar en cuenta la cantidad de voltios que se le puede aplicar debido a la batería y también los amperios que consume para elegir el controlador de velocidad electrónico adecuado para proteger al motor de los picos de corriente (20% mayor al número de amperios de consumo), todos los datos los podemos encontrar en una hoja de información de acuerdo al tipo de motor en la cual también especifican la potencia, el poder y el empuje de acuerdo a la hélice y batería.



Figura 12. Motor eléctrico.
Fuente: (Dronpedia, 2015)

En la aeronave de despegue vertical que se construirá se usará un tipo de motor, para el levante del VTOL son tres motores (tricóptero) 2312 marca DJI sin escobillas de 960 kv el cual en conjunto con una batería de 3 celdas (11.1 v) y una hélice 9045 generará individualmente una corriente de 9,6 Amperios, potencia de 105 Watts, un levante de 350 gramos y tracción para el empuje horizontal de 710 Gramos. El motor eléctrico pesa alrededor de 50 gramos, tiene un altura de 30 mm

y una anchura de 27.7 mm, este es el motor adecuado para levantar el peso de la aeronave sin ningún inconveniente. Al momento de la conversión de modo de vuelo de la aeronave de despegue vertical los motores delanteros cambiarán el ángulo de inclinación de 90 grados a 180 grados para obtener el empuje de los motores y la sustentación de las alas, estarán dispuestos de la misma manera que una aeronave bimotor el sentido de rotación de los motores delanteros será desigual.

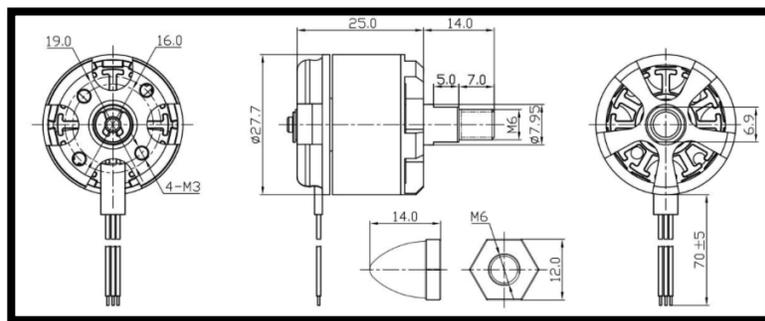


Figura 13. Dimensiones Motor rocket 2212 1000 KV.
Fuente: (RCMART, 2018)

2.7.2 Controlador de velocidad electrónico (ESC).

Los controladores de velocidad electrónicos con sus siglas en inglés ESC: *electronic speed controller*, son dispositivos electrónicos que convierten la corriente directa que se recibe de la batería a corriente pulsante que se distribuirá a los motores brushless, estos aparatos se categorizan según la cantidad de amperios que pueden soportar, como se explicó anteriormente en la hoja de datos de un motor encontramos el valor de consumo de corriente, para escoger el ESC indicado debemos aumentar alrededor de 20% - 30% adicional en valor numérico respecto al amperaje de consumo del motor, que en general representa de 10 a 15 amperios mas de los usado por el mismo para protegerlo de picos de corriente.

Una característica adicional de los controladores de velocidad electrónicos es que puede contener un circuito eliminador de batería (BEC) el cual se usa para alimentar servos, receptores, tarjetas controladores de vuelo, entre otros componentes con una salida de 5 voltios y 2 amperios. Los ESC están formados por tres secciones, la primera consta de dos cables que son conectados directamente a la batería y un conjunto de dos cables adicionales que se conectarán a la tarjeta controladora de vuelo, la segunda es el dispositivo que transformará la corriente directa de la batería en alterna hacia los motores, y la tercera parte esta formada por tres cables que deben ser conectados a los motores brushless, el funcionamiento del ESC se basa en la conmutación de la salida de voltaje para que el motor se mueva de acuerdo a los mandos emitidos por el transmisor, cambiándola de acuerdo a los requerimientos del piloto.

En el interior de los ESC encontramos pequeños interruptores que secuenciarán la salida de voltaje para que el motor se mueva de acuerdo a los parámetros necesarios, los controladores de velocidad electrónicos tienen un pequeño procesador que es donde se carga el firmware que controlará el comportamiento del ESC respecto al motor brushless, los firmware más conocidos para estos dispositivos son: Simon K y BL Heli, cada uno con características distintas, el primero tiene la cualidad de estar pre configurado para ser usado en multirrotores y además posee un tiempo de respuesta alto, por otro lado el BL heli tiene las mismas características que el anterior pero con la singularidad de una opción llamada *one shot* o *active breaking* (de un solo golpe) que tratará de

disminuir las revoluciones del motor inmediatamente después reducir la potencia, al no tener esta opción habilitada el tiempo de respuesta será mucho mayor gracias al impulso guardado en el motor, este dispositivo se configura a través de la tarjeta controladora de vuelo, de igual manera a través del transmisor se los debe sincronizar para que todos trabajen al mismo tiempo y evitar accidentes.



Figura 14. ESC.

Fuente: (MOBUS, 2018)

Para determinar los controladores de velocidad adecuados para los motores brushless con los que se va a construir la aeronave de despegue vertical se debe visualizar la tabla de desempeño de los motores y aumentar de un 20% - 30% de Amperaje de consumo en los ESC para evitar que los motores se quemen. La tabla de datos de los motores DJI se muestra a continuación.

KV	Hélices	ESC	Batería	Peso máximo al despegue	Empuje máximo
800	DJI 9450	420LITE	4S LiPo	350~400g/por motor	850g/motor
960	DJI 9450	420LITE	3S LiPo	350g/por motor	710g/motor

Figura 15. Tabla de desempeño de los motores.

Fuente: (Amazon, 2018)

Según los datos del fabricante para los motores de 960 Kv se usara un voltaje de 11.1 voltios, es decir, una batería de 3 celdas, con la hélice 9045 generará una corriente de 9.5 Amperios, por tal razón se debe usar un controlador de velocidad electrónico de:

Controlador de velocidad electrónico adecuado

$$= \text{voltaje de carga} + 20\% \text{ voltaje de carga}$$

$$\text{Controlador de velocidad electrónico adecuado} = 9,5 A + (9.5A)(0.20)$$

$$\text{Controlador de velocidad electrónico adecuado} = 11.4 A$$

Según los cálculos se podría usar un controlador de velocidad electrónico de 15 Amperios, sin embargo, al ser una aeronave para instrucción se puede prevenir cortocircuitos aumentando el número de amperios que soportara el ESC a 40 A, esta acción no repercute en el desempeño de los motores ni de la aeronave en vuelo.



Figura 16. ESC 20 A.
Fuente: (Pinterest, 2019)

2.7.3 Tarjeta distribuidora de energía (PDB).

Las tarjetas distribuidoras de energía con sus siglas PDB: *power distribution board*, son dispositivos que nos ayudarán a repartir el voltaje de la batería hacia los controladores de velocidad de forma directa, estos componentes no tienen filtros, resistencias u otros elementos, a muchas personas no les gusta usar un distribuidor de energía ya que se puede obtener un vínculo directo a la batería, pero la idea del PDB es tener una conexión más limpia, BEC en caso que los controladores de velocidad ESC no tengan instalado uno y salidas de voltaje adicional para FPV o cámaras en el VTOL.



Figura 17. Tarjeta de energía
Fuente: (Pinterest, 2019)

2.7.4 Computadora de vuelo.

a. KK2.1.

La tarjeta controladora de vuelo o computadora de vuelo es uno de los elementos más importantes en la fabricación de una aeronave o dron, existen muchos tipos de controladores de vuelo como: Naza M lite, Naze32, CC3D, KK2.1, entre otras, se usan de acuerdo a la aplicación de la aeronave, en este

caso se puede usar la Pixhawk 2.4.8 o la KK2.1 en la cual se puede cargar un software especial para dispositivos de despegue vertical llamado Open Aéreo VTOL. El funcionamiento de las computadoras de vuelo es estabilizar a la aeronave encontrando el horizonte y conociendo la posición del avión o dron respecto al mismo, en otras palabras, la tarjeta controlará la aceleración de los motores para mantener al avión siempre horizontal corrigiendo errores respecto al viento, la tarjeta trabaja con un voltaje de 5 voltios obtenido de los controladores de velocidad electrónicos o de la tarjeta distribuidora de energía. Dentro del computador tenemos acelerómetros y giroscopios que nos ayudaran a mantener velocidad, altitud y posición.

Este dispositivo es muy necesario ya que ningún VTOL puede funcionar sin la configuración adecuada, es necesario usar una tarjeta de vuelo para el proyecto ya que mediante esta podemos cambiar los modos de vuelo y configurarla para que la aeronave de despegue vertical funcione de manera adecuada. La característica principal de la KK2.1 es que tiene una pantalla LCD en la cual podemos hacer diferentes cambios con tan solo cargar el software Open Aéreo VTOL y mediante un sistema de 4 botones se logra realizar los cambios deseados en el sistema de vuelo.

La tarjeta KK2.1 funciona con una tensión de 5 voltios que se puede obtener de un BEC o de un ESC que se conecta directamente al pin del primer motor, las salidas de voltaje de los pines de conexión de M2 a M8 están unidas entre sí

lo que significa que se pueden usar todas estas salidas para alimentar servos u otros dispositivos que necesiten de un voltaje igual al suministrado. Al momento de configurar una computadora de vuelo es de suma importancia que las hélices se encuentren desinstaladas del motor, son precauciones de seguridad que se deben seguir para evitar accidentes, de igual forma es necesario que la flecha de la parte superior de la tarjeta siempre apunte hacia el frente del avión de despegue vertical ya que el computador de vuelo esta configurado para que la aeronave siga con esa posición, por comodidad de uso muchas personas no ubican la tarjeta correctamente lo que ocasiona gran confusión en el dispositivo y no despegará sin que se encuentre de forma adecuada en el avión.



Figura 18. KK2.1

Fuente: (Amazon , 2018)

b. Pixhawk 2.4.8.

La controladora de vuelo Pixhawk 2.4.8 es un dispositivo de software libre que se puede configurar con distintos parámetros y software como: qgroundcontrol, ardupilot, APM plane, entre otros, a través de un firmware llamado PX4, las características de este dispositivo electrónico son (Pixhawk, 2016):

Especificaciones:

- 1 Autopiloto Pixhawk PX4 32-bit V2.4.8 W/ con pulsador de seguridad
- Bit 1.32 STM32F427 flash Cortex M4
- Frecuencia: 256K, RAM 168MHZ
- 3.32 bit STM32F103 procesador de respaldo

Sensores

- L3GD20 3 axis digital 16 bit gir6scopo
- LSM303D 14/ 3 axis aceler6metro - Br6jula
- MPU6000 6 axis aceler6metro - Br6jula
- MS5611 Bar6metro alta precisi6n

Interfaces:

- Entrada compatible con Spektrum DSM / DSM2 / DSM-X® Satellite
- Entrada y salida compatible con Futaba S.BUS®
- Se6al PPM sum (incluye decodificador para PWM tradicionales)
- Puerto micro USB externo

Peso y dimensiones:

- Peso: 38 g (1,31 oz)
- Ancho: 50 mm (1,96 ")
- Espesor: 15,5 mm (0,613 ")
- Longitud: 81.5mm (3,21)

El tipo de software que se va a cargar en la computadora de vuelo y la configuración para que nuestro avión trabaje como VTOL se especificará en el capítulo 3 del proyecto.



Figura 19. Pixhawk 2.4.8.
Fuente: (Robocraft, 2018)

2.7.5 Hélices.

Las Hélices son mecanismos compuestos por palas que giran alrededor de un eje para proporcionar el empuje en aeronaves y sustentación en drones generalmente elaboradas de plástico o fibra de carbono, en el aeromodelismo las hélices tiene 3 medidas principales, el largo de punta a punta generalmente en

pulgadas, la inclinación medida en grados, mientras mas pronunciada es la medida de la hélice genera mayor empuje y consumo de energía y la última medida es el diámetro del eje, el estándar es de 5 milímetros, sin embargo podemos encontrar de 4, 3 o 2 mm, existen espaciadores en caso que necesitemos y generalmente todos los fabricantes de hélices los incluyen al momento de comprarlas. Al ser alas que rotan las hélices tienen un sentido de giro horario o anti horario que no se puede invertir, deben ser colocadas de acuerdo al sentido de rotación del motor. Las medidas vienen en una serie de 4 dígitos como 6030, los dos primeros se refieren al largo en pulgadas y los siguientes al ángulo, estas medidas las encontramos en la parte superior de la hélice así como el sentido de rotación de la misma

Existen hélices con 2 y 3 palas, las que cuentan con dos palas se caracterizan por ser de dos tipos: tradicional, tiene una punta mas redondeada y la peculiaridad de ser mas eficientes respecto al consumo de batería pero no genera demasiada potencia, el otro tipo consta de una punta mas cuadrada de la cual obtendremos mas potencia, ocasionara turbulencia por lo tanto un mayor consumo de energía, por último las hélices con 3 palas ofrecen mayor empuje sin embargo no se pueden usar en todos los motores, si no en los que se especifica en la hoja de datos del mismo.

Las hélices tienen un desgaste por el uso, antes de instalarlas en la aeronave de despegue vertical es necesario balancearla a través de un dispositivo especial

para este caso, si no se equilibran los pesos de forma adecuada la hélice empezará a vibrar, por lo tanto generará confusión a la computadora de vuelo y no será eficiente el control de la aeronave, a futuro dañará los motores y dispositivos electrónicos usados en la construcción del avión de despegue vertical, el balanceo se realiza aumentando peso en la parte superior de la pala de la hélice hasta que la misma quede totalmente equilibrada o lijando la parte inferior de la misma hasta lograr el mismo resultado.

La hélice que se usará en el dispositivo de despegue vertical es la especificada en la tabla de desempeño de los motores brushless DJI para el levante, esta será una hélice 9050, 9 pulgadas de diámetro y 50 grados de inclinación.



Figura 20. Hélices.
Fuente: (Pinterest, 2019)

2.7.6 Cuadro o Aeronave a escala.

Tanto en el mundo de los drones como en el de los aviones a escala existen modelos de aeroplanos y cuadros de cuadricópteros que se arman de acuerdo a las necesidades, podemos encontrarlos en varios materiales entre los cuales resaltan fibra de carbono, plástico, foam board, entre otros, estos componentes sirven de apoyo estructural a la hora de implementar los dispositivos electrónicos.

Las aeronaves a escala nos brindan la aerodinámica óptima para que el avión pueda sustentarse en la atmósfera e incluso pueda planear en caso de falta de potencia en los motores, de igual manera nos brindan un soporte para todo el equipo electrónico a través de un compartimiento especial para guardarlos, por otro lado en los drones existen cuadros los cuales tienen la misma funcionabilidad a diferencia de la carencia de aerodinámica en su diseño, los cuadros se miden en milímetros desde el centro de la base del motor hasta el núcleo del soporte, esta medida es demasiado importante debido al tamaño de la hélice.

La construcción del fuselaje del avión de despegue vertical se centrara en el uso de foam board, es un componente que consta de una plancha de espuma Flex recubierta de vinyl para mayor fuerza, este material es resistente y muy liviano, estas características lo hacen el material perfecto ya que será de gran ayuda al ser un avión de entrenamiento, de igual manera el foam board se encuentra fácilmente en caso de que se tenga que realizar una modificación o reparación al VTOL.



Figura 21.Cuadro de dron.

Fuente: (Drone, 2018)

2.7.7 Receptor.

Para poder controlar la aeronave de despegue vertical es mandatorio tener un transmisor y un receptor, estos se usan para controlar la actitud de la aeronave, el receptor esta estrictamente ligado a los canales del transmisor y este recibe las señales emitidas por el transmisor en una frecuencia de 2,4 GHz, los canales representan cada uno de los movimientos en la aeronave y se configuran de acuerdo a señales, principalmente están diseñados para enviar señales PWM – *pulse width modulation*, significa que cada canal del receptor esta ligado a un movimiento emitido por el transmisor. Este dispositivo se alimenta con 5 voltios que se pueden obtener de la batería, PDB, tarjeta controladora de vuelo o de los ESC.

Los receptores tienen dos antenas flexibles para recibir la señal del transmisor y se deben conectar con un ángulo de 90 grados para aprovechar de manera adecuada la comunicación entre ambos componentes, cada receptor tiene un rango de funcionamiento de acuerdo al fabricante del dispositivo, puede variar entre 100 y 4000 metros de distancia.

Los aviones a control remoto tienen distintos protocolos de comunicación, los mas significativos son: PPM, PWM, PCM, Sbus, entre otros, estos serán descritos a continuación:

- PWM: modulación por ancho de pulso o en inglés Pulse Width Modulation es un tipo de protocolo de comunicación que se caracteriza por ser el más antiguo y trabajar con señales analógicas, este necesita un conector por cada movimiento para que la señal se reciba de forma correcta.
- PPM: modulación por posición de pulso o en inglés Pulse Position Modulation es una actualización del PWM y de igual manera trabaja con señales analógicas, la diferencia es que en lugar de necesitar un cable por cada movimiento, solo se necesita uno y la señal se envía una detrás de otra.
- PCM: modulación por código de pulso o en inglés Pulse Code Modulation es un salto de señal analógica a digital, los problemas con interferencia y errores se mejora, sin embargo es un dispositivo mucho mas costoso que los anteriores y al igual que la señal PPM para la comunicación solo se necesita de un cable de señal, este tiene la desventaja de no ser estandarizado para el uso en drones o aviones RC.
- Sbus: serial bus, como su nombre indica es un protocolo de comunicación en serie, con este receptor se pueden obtener señales de hasta 18 canales con un solo cable y la señal que emite es digital, es uno de los mas avanzados y económicos en el mercado.

Para controlar el dispositivo de despegue vertical se puede usar un receptor con señal PPM o PWM con un radio control de por lo menos 5 canales.

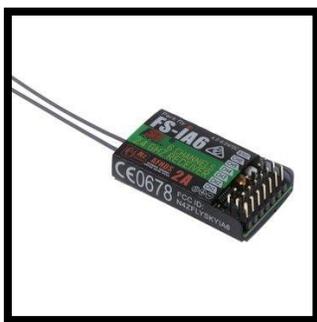


Figura 22. Receptor.
Fuente: (FlySky, 2018)

2.7.8 Transmisor.

Los transmisores son usados para enviar la señal hacia los receptores y que la aeronave imite los movimientos que se hacen en los mandos del control. El transmisor se caracteriza por la cantidad de canales que puede manejar y de acuerdo a eso se configura el dron o la aeronave, los canales se refieren a la cantidad de dispositivos que puede controlar el transmisor, por ejemplo si un mando tiene 4 canales este podrá generar el movimiento en el acelerador, la acción de guiñada, inclinación y alabeo, si el transmisor posee mas canales se podrán configurar servos u otro tipo de componentes dentro de la aeronave.

Existen transmisores muy sencillos que contienen únicamente cuatro canales, sin embargo para la construcción del VTOL es necesario un radiocontrol de 5 canales, el quinto canal es un interruptor de dos posiciones que servirá para cambiar el modo de vuelo de la aeronave. Los radios se comunican con los receptores con una frecuencia de 2,4 GHz, una banda similar a la que usan los teléfonos celulares y los módems de internet, por tal razón es recomendable no

usar un radiocontrol cerca de muchos dispositivos inalámbricos lo cual podría causar interferencia en la señal.

Una característica importante dentro de los transmisores es que tienen la capacidad de almacenar un cierto número de receptores, esto significa que con un solo radio se pueden controlar varios dispositivos, uno a la vez, por ejemplo: drones, aviones, alas, tricópteros, entre otros, la cantidad depende de la memoria interna de cada radiocontrol. Para conectar un receptor a un cierto tipo de transmisor es necesario saber el protocolo de comunicación que pueden soportar y poder entrelazarlos entre si para que la aeronave funcione.



Figura 23. Radio control.
Fuente: (FlySky, 2018)

2.7.9 Batería de polímero de litio.

Las baterías de polímero de litio o LiPo son los componentes encargados de almacenar la energía para que todo el sistema electrónico del avión de despegue vertical funcione, son las más usadas en el mundo del radiocontrol, estas se caracterizan por tener un número determinado de celdas y de acuerdo a esto se puede determinar el voltaje total de la batería, cada celda puede contener una tensión de entre 3,7 y 4,2 voltios, el voltaje necesario para que funcione el VTOL

viene determinado de acuerdo a la tabla de características de los motores brushless, por lo general se usan baterías de 3 o 4 celdas lo que significa que en total emitirá una tensión de entre 11 y 15 voltios, dependiendo del dispositivo que se desea energizar se pueden usar baterías mas grandes o mas pequeñas.

Otro valor clave en las baterías de polímero de litio es la intensidad de corriente eléctrica que se define como: la cantidad de electrones que fluyen por unidad de tiempo a través de un equipo conductor, la unidad internacional para la intensidad es el amperio, mientras mas amperaje posea una batería esta será de mayor dimensión, el que sea mas grande no significa que almacenara mas energía, se trata de encontrar el equilibrio perfecto de los materiales y optimizar los recursos energéticos, si una batería es de mayor tamaño la aeronave tendrá que realizar un esfuerzo mas alto para levantarla y no servirá de mucho el amperaje extra, una desventaja de las baterías es que tienen un límite de tiempo de uso muy corto y una carga extensa, por cada 2 horas de carga de la batería el VTOL funcionará alrededor de 5 minutos, el tiempo se determina de acuerdo a la tasa C, definida como la descarga relativa a su máxima capacidad, mientras mayor sea la tasa C la batería entregará la energía de forma eficiente y el costo de la misma será mayor.



Figura 24. Batería LiPo.

Fuente: (Pinterest, 2019)

Para la selección adecuada de la batería se debe tomar en cuenta la tabla de desempeño de los motores brushless, tomando en cuenta que funcionarán eficientemente con una tensión de 11.1 voltios es necesario una batería de 3 celdas, la cantidad de componentes eléctricos en el VTOL es demasiada por tal razón se tomo en cuenta una batería de 2200 mAh marca Ovonix Air con un peso de 120 gramos, dimensión 105x 33x 14 mm que funciona a través conectores xt60 para entregar la carga, el consumo de energía está detallado en el capítulo 3 del proyecto.

2.7.10 Servos.

Los servos son componentes electrónicos que se usan en el mundo del aeromodelismo para mover las superficies de control: alerones, elevadores y rudder en aeronaves eléctricas, en aviones con motores a combustión se usan para los mismos propósitos incluido el de actuar como acelerador, los servos cuentan con 3 cables para su funcionamiento (rojo, negro, marrón), el cable rojo se usa para alimentar al dispositivo, el cable negro como tierra y el marrón es el

que recibe la señal, en receptores con señal PWM, cada cable se conecta directamente al mismo para poder duplicar el movimiento emitido por el transmisor, en aviones con otro tipo de conexión como Sbus los servos se conectan directamente a la tarjeta controladora de vuelo.

Los servos se clasifican por su peso, los mas usados en el aeromodelismo eléctrico son los de 8,5 y 12 gramos por su tamaño reducido y gran porcentaje de fuerza, sin embargo en aeroplanos a escala con mayor proporción se usan servos mas pesados y de materiales mas resistentes como el metal, es importante que estos dispositivos se ubiquen en la posición correcta pues a pesar que su peso no es elevado puede variar el centro de gravedad de la aeronave y causar accidentes.

En la aeronave VTOL se deben usar 4 servos de 8,5 gramos, 23x11.5x24mm y un torque de 1.8 kgf.cm, una peculiaridad en algunos aeromodelos es que en los alerones es necesario hacer una conexión especial, en la cual solo un cable de señal alimenta a los dos dispositivos, es necesario ubicar de manera adecuada la salida de los alerones en la tarjeta controladora de vuelo o en el receptor para que estos funcionen en el mismo rango de movimiento pero en sentido inverso.

Los servos son capaces de transmitir el movimiento de guiñada, alabeo y cabeceo, esto se logra mediante barrillas de metal y pequeños empalmes que se encargarán de realizar las acciones determinadas.



Figura 25. Servo.
Fuente: (Pinterest, 2019)

2.8 Tipos de VTOL a control remoto.

Una aeronave de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) es aquella que puede comenzar su vuelo en un plano perpendicular al piso, es decir 90 grados y posteriormente cambiar su modo de vuelo para continuar con la trayectoria de la aeronave horizontalmente, en la actualidad existen varios modelos de este tipo de avión que se usan, en su mayoría, en aplicaciones militares, sin embargo, en el mundo del aeromodelismo se utilizan para realizar varias actividades sin comprometer el espacio de despegue del vehículo aéreo no tripulado y por su versatilidad en el diseño y velocidad. Dentro del mundo de los aviones de despegue y aterrizaje vertical encontramos únicamente tres diseños: convertiplanos, tricópteros y aeronaves híbridas, los cuales tienen sus ventajas y desventajas.

- **Convertiplanos:** las aeronaves de este tipo únicamente cuentan con dos motores eléctricos generalmente ubicados en los extremos de cada ala delante de centro de gravedad, son aquellas que tienen la capacidad de cambiar la posición del ángulo de los motores (motores rotativos) para transformar el modo

de vuelo. La mayoría de los componentes de estos aviones deben estar debajo del centro de gravedad ya que si existe alguna desproporcionalidad en el peso de la aeronave, esta tiende a caer, esto aplica para servos, controladores de velocidad electrónicos, computador de vuelo, entre otros, sin contar el peso de la batería el cual es sumamente mayor al de los componentes anteriores, esta se debe encontrar en la punta del prototipo para que compense el peso de la cola del avión. Una ventaja evidente en este modelo es la disminución de motores brushless lo que genera un ahorro significativo en la energía, por lo tanto, mayor tiempo de vuelo.



Figura 26. Convertiplano.

Fuente: (Pinterest, 2019)

- **Tricópteros:** en el mundo de las aeronaves de despegue y aterrizaje vertical los tricópteros son muy usados en la construcción de nuevos modelos, en especial porque cuentan con un motor adicional en la parte posterior del avión el cual genera una estabilización del aeroplano, los motores están separados a 120 grados, los dos motores delanteros tienen la función de cambiar la posición del ángulo de funcionamiento para que en primera instancia el dispositivo funcione como dron, es decir el levante este proporcionado por los tres motores en

conjunto, al momento del cambio de ubicación de los motores delanteros el posterior queda totalmente parado, así el levante es proporcionado por las alas del dispositivo y el empuje por los motores delanteros, gracias a las computadoras al momento de cambiar la modalidad de vuelo el VTOL se auto estabiliza para no caer.



Figura 27. Tricóptero VTOL.
Fuente: (Flite Test, 2018)

- **Híbridos:** en este tipo de aeronaves no existe ningún mecanismo de cambio de ángulo en los motores, se trata de un diseño con empuje y levante separado que consta de una estructura alar fija con dos montantes en las alas donde se ubican 4 motores en la esquina de cada montante que son usados para elevar el vehículo aéreo y un motor adicional en la parte posterior que servirá como empuje de toda la aeronave. El funcionamiento de la aeronave de despegue vertical híbrida consta de tres etapas: despegue, vuelo recto, aterrizaje, para el despegue los 4 motores se encienden y elevan a la aeronave, el motor posterior se encuentra apagado, una vez en vuelo, el motor posterior se enciende y los 4 motores ubicados en las alas se apagan, la aeronave continúa con vuelo recto y nivelado de forma horizontal, en la etapa del aterrizaje los motores ubicados en

los montantes del ala se encienden y el posterior se apaga, teniendo el manejo del avión con los movimientos de un cuadricóptero. Al tener un mayor número de componentes electrónicos el consumo energético es superior y el tiempo de vuelo amenera, sin embargo, es de suma importancia destacar la facilidad de uso, una de las desventajas de un VTOL híbrido es la resistencia que genera cada uno de los montantes en las alas.



Figura 28. VTOL Híbrido.
Fuente: (Flite Test, 2018)

2.8.1. Decisión de diseño.

Entre los tipos de aeronaves de despegue y aterrizaje vertical que se pueden construir encontramos diseños como: tricópteros, motores rotativos e híbridos, cada uno cuenta con características especiales, ventajas y desventajas. Se determinó que se construirá una aeronave de despegue vertical tipo tricóptero por su facilidad de construcción, diseño simple, vuelo estable y ahorro energético. Las otras clases de VTOL también pueden ser construidas y pueden volar bien, sin embargo, el nivel de dificultad es mucho mayor al de una aeronave tricóptero. Las desventajas que podemos encontrar en los diseños son las siguientes:

- **Convertiplano o motores rotativos:** para cambiar la posición del ángulo de los motores se necesita un dispositivo de rotación los cuales son complicados de realizar, se puede decir que mediante esta técnica el peso disminuye al usar los mismos motores para el levante y empuje del avión, puede ser verdad, sin embargo, el peso es recompensado en el mecanismo de rotación y los servos adicionales que se necesitan para moverlos, de igual manera, la hélice que se usará para el levante y el empuje del VTOL es la misma, al tener un ángulo menor las hélices serán productivas en el levante, pero ineficientes en vuelo horizontal, ejemplo: V22 Osprey.
- **Tricópteros:** se puede construir un modelo con tres motores, sin embargo es necesario que tengan motores rotativos, lo que significa peso adicional en los dispositivos de rotación y un diseño más complejo. Además de los problemas de peso mencionados, el motor posterior también se vuelve un inconveniente, apagar el motor posterior de manera adecuada manteniendo la sustentación de la aeronave es un reto no muy fácil de hacer, se puede resolver, sin embargo es mucho mas complicado que un híbrido, ejemplo: Qloyter
- **Híbridos:** la desventaja del peso adicional de los motores y el arrastre de los montantes del mismo no es tan significativa a comparación de la pérdida en la eficiencia por parte de las hélices, ejemplo: Flite Test Explorer

Tabla 1*Resumen de selección de construcción de VTOL*

TIPO	MODELO	IMAGEN	VENTAJA	DESVENTAJA
Tricóptero	Qloyter		Mayor estabilidad, menor consumo energético	Dificultad en la construcción
Motores rotativos	V22 Osprey		Menor consumo energético, diseño 3D	Cálculo exacto del centro de gravedad, dificultad mayor en la construcción
Híbrido	Flite Test Explorer		Facilidad de construcción, estabilidad en vuelo	Mayor consumo energético

CAPÍTULO III

DESARROLLO

3.1. Preliminares.

Antes de empezar con la construcción del mecanismo de cambio de modo de vuelo de flotante a normal de una aeronave de despegue vertical es necesario determinar el consumo energético de los componentes eléctricos y electrónicos que se usaran en el proyecto para obtener el tiempo promedio de uso de la aeronave antes que se descargue completamente. Como se explicó anteriormente se construirá el VTOL con una batería de 2200 mAh, cabe destacar que en las especificaciones del fabricante de la batería se explica que no se debe sobrecargar ni tampoco descargar en exceso la batería de polímero de Litio, por tal razón se tomó en cuenta que se usará solamente un 90% de energía de la batería que representa un total de 1980 mAh.

3.1.1 Consumo energético motores sin escobillas.

Los motores sin escobillas o brushless son los componentes que mas energía consumen, en la sección 2.7.1 podemos evidenciar la cantidad de amperios - hora (9,5 Ah, es decir que puede entregar 9,5 amperios una hora antes que se descargue la batería por completo) que gasta cada uno de los motores de levante y empuje horizontal ubicados en el ala y parte posterior del avión por hora de consumo, con el siguiente cálculo se determinó el consumo individual en miliamperios del motor brushless.

$$\text{Consumo del motor brushless (mAh)} = \frac{\text{amperaje consumido por hora}}{1 \text{ Ah}} \times 1000 \text{ mAh}$$

$$\text{Consumo del motor brushless (mAh)} = \frac{9,5 \text{ Ah}}{1 \text{ Ah}} \times 1000 \text{ mAh}$$

$$\text{Consumo del motor brushless (mAh)} = 9500 \text{ mAh}$$

El consumo calculado es individual y lineal, por tal razón, se debe multiplicar el gasto energético obtenido por la cantidad de motores, es decir, 3 motores eléctricos para conseguir el consumo total en modo tricóptero. Dentro de todos los cálculos no se toma en cuenta la perturbación y par de fuerza asociado. El consumo de todos los componentes es promedio, el consumo exacto es muy complicado de calcular ya que la descarga varía por distintos valores como temperatura, en este caso se mantuvo constante.

$$\text{Consumo energético total motores de levante} = (\text{consumo motor brushless} \times 3)$$

$$\text{Consumo energético total motores de levante} = (9500 \text{ mAh} \times 3)$$

$$\text{Consumo energético total motores en levante} = 28500 \text{ mAh}$$

Al usar los mismo motores para sustentar al avión en modo tricóptero como en modo avión, en el cálculo total de consumo se dividirá al vuelo en etapa de ascenso y vuelo horizontal, únicamente cambiando los tiempos de vuelo en cada fase y los motores usados, para el vuelo horizontal únicamente funcionan dos motores por lo tanto el consumo es:

Consumo energético total motores vuelo horizontal

$$= (\text{consumo motor brushless} \times 2)$$

$$\text{Consumo energético total motores de vuelo horizontal} = (9500 \text{ mAh} \times 2)$$

$$\text{Consumo energético total motores de vuelo horizontal} = 19000 \text{ mAh}$$

3.1.2 Consumo energético servos

Para calcular el consumo energético en los servos se necesita saber la cantidad de amperios por minuto que cada uno de estos consume, especificado por el fabricante, el servo metálico usado en el proyecto consume 0,30 Ah (corriente nominal) este dato se transformará y multiplicará por el número de servos (4) que se ubicarán en el dispositivo de despegue vertical. Partiendo de los datos que nos otorga el fabricante se puede obtener la potencia mecánica de los servos, es decir la rapidez con la que el servo realiza su trabajo, esta se mide en watts y se demuestra a continuación:

DATOS:

Voltaje = 6 voltios

Torque = 1.8 kgf.cm

Velocidad = 0,10 sec/ 60 grados

$$\text{Momento} = \frac{1,8 \text{ kgf.cm} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ N}}{100 \text{ cm} \times 1 \text{ kg}}$$

$$\text{Momento} = 0,18 \text{ Nm}$$

$$\text{Ángulo en Radianes} = \frac{\pi}{180} \times 60$$

$$\text{Ángulo en Radianes} = 1,047 \text{ rad}$$

$$\text{Velocidad angular} = \frac{\alpha}{\text{Tiempo}}$$

$$\text{Velocidad angular} = \frac{1,047 \text{ rad}}{0,10 \text{ seg}} = 10,47 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\text{Potencia} = \text{momento} \times \text{velocidad angular}$$

$$\text{Potencia mecánica} = 0,18 \text{ Nm} \times 10,47 \text{ rad/seg}$$

$$\text{Potencia mecánica} = 1,88 \text{ W}$$

- Potencia eléctrica con corriente nominal del servo.

$$\text{Intensidad} = 0,31 \text{ Ah}$$

$$\text{Consumo energético servos} = \frac{\text{Amperaje (Ah)}}{1 \text{ Ah}} \times 1000 \text{ mAh} \times 4 \text{ servos}$$

$$\text{Consumo energético servos} = 1240 \text{ mAh}$$

La cantidad de energía que consumen los demás dispositivos electrónicos es despreciable, a partir de los datos obtenidos se puede sacar la cantidad de minutos que puede durar la batería.

3.1.3 Consumo energético total.

Para determinar el consumo energético total se debe sumar los valores obtenidos para obtener de forma adecuada el valor promedio de acuerdo a la batería de 2200 mAh, la cual usará únicamente el 90% de su capacidad, es decir, 1980 mAh.

- Consumo energético total 3 motores brushless y servos.

$$\text{Consumo Tricóptero} = \text{consumo motores de levante} + \text{consumo servos}$$

$$\text{Consumo} = 28500 \text{ mAh} + 1240 \text{ mAh}$$

$$\text{Consumo} = 29740 \text{ mAh}$$

$$\text{Tiempo (minutos)} = \frac{1980 \text{ mAh} \times 1 \text{ h}}{29740 \text{ mAh}} = 0,067 \text{ horas (3,995 minutos)}$$

- Consumo energético con 2 motores brushless y servos.

Consumo aeronave convencional = consumo motores + consumo servos

$$\text{Consumo} = 19000 \text{ mAh} + 1240 \text{ mAh}$$

$$\text{Consumo} = 20240 \text{ mAh}$$

$$\text{Tiempo (minutos)} = \frac{1980 \text{ mAh} \times 1 \text{ h}}{20240 \text{ mAh}} = 0,098 \text{ horas (5,870 minutos)}$$

- Cálculo aproximado con 2 minutos modo tricóptero.

Para cuantificar el promedio de tiempo que va a soportar la batería seleccionada se tomó como referencia 2 minutos en modo tricóptero, a continuación se presentará el cálculo de tiempo en modo avión a partir del dato referencial.

$$\text{Consumo modo tricóptero (2 minutos)} = \frac{2 \text{ min} \times 1980 \text{ mAh}}{3,995 \text{ min}} = 991,239 \text{ mAh}$$

$$\text{Miliamperios restantes en batería} = 1980 \text{ mAh} - 991,239 \text{ mAh} = 988,761$$

$$\text{Consumo en minutos modo avión (988,761 mah)} = \frac{988,761 \text{ mAh} \times 5,87 \text{ min}}{1980 \text{ mAh}} = 2,93 \text{ min}$$

Suma tiempo consumo = tiempo modo tricóptero + tiempo modo avión

$$\text{Suma tiempo consumo} = 2 \text{ min} + 2,93 \text{ minutos} = 4,93 \text{ min}$$

- Equivalencia del decimal 0,93 en segundos

$$x = \frac{0,93}{100} \times 60$$

$$x = 0,558 \text{ seg}$$

El tiempo de vuelo estimado de la aeronave de despegue vertical será de 4 minutos con 56 segundos con descarga de la batería de 90%.

Tabla 2

Resumen consumo energético de la aeronave

COMPONENTE ELECTRÓNICO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	CONSUMO POR MINUTO	TIEMPO DE VUELO DEL PROTOTIPO
Motores de levante	3	960 KV	28500 mAh	4 minutos 56 segundos
Motor de empuje	2	960 KV	19000 mAh	
Servos	4	8,6 gramos	1240 mAh	
Otros componentes	2	Computador de vuelo, ESC	No significante	
TOTAL CONSUMO ENERGÉTICO				1980 mAh

3.2. Diagrama eléctrico de bloque.

Es necesario entender de forma adecuada las conexiones de cada uno de los componentes, si se hicieran de manera errónea es posible que se quemen y dañen a otros dispositivos, generalmente se conecta de forma inadecuada los motores, controladores de velocidad electrónicos y salidas de la computadora de vuelo, de igual manera se debe conocer la secuencia del conectado eléctrico en caso de falla o

desconexión de alguno de los componentes, el diagrama que se presentará a continuación es de bloques que en conjunto con imágenes de los componentes generarán una visión general de las conexiones para el mantenimiento y reparación de la aeronave de despegue vertical.

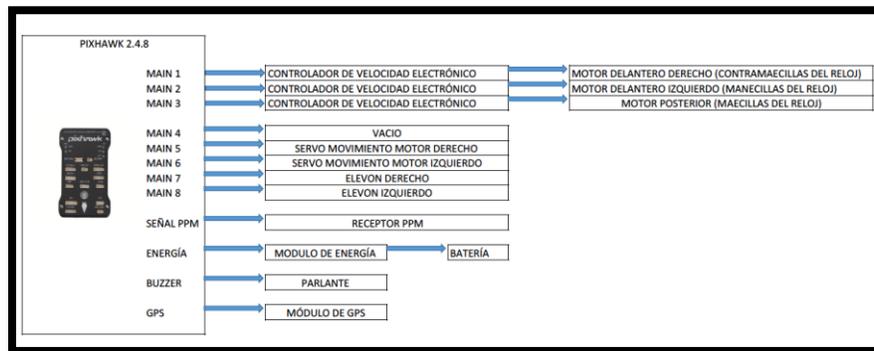


Figura 29. Diagrama de bloque.

Es de suma importancia verificar las conexiones en la computadora de vuelo Pixhawk ya que si se realiza esta acción de forma incorrecta o con polaridades inadecuadas pueden dañar la tarjeta controladora de vuelo, el diagrama de bloque muestra en general las conexiones eléctricas que se deben hacer para que la aeronave funcione de manera adecuada.

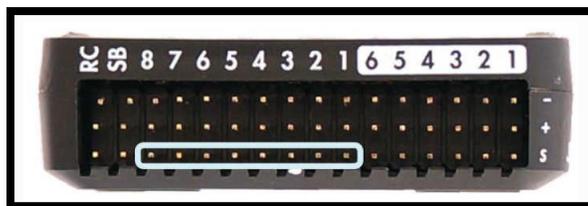


Figura 30. Pines de conexión pixhawk.

Fuente: (Pixhawk, 2016)

3.3. Construcción del aeroplano.

3.3.1. Material.

Para montar los equipos electrónicos es necesario tener una aeronave, la construcción se realizará con un material llamado foam board, un material compuesto por espuma recubierta por dos capas de papel de alta calidad usados generalmente en diseños de interiores, manualidades, aeroplanos, rótulos, entre otros, son planchas de 2 metros 20 cm de largo, 1 metro 80 centímetros de ancho y 5 milímetros de espesor, las cualidades del material son las siguientes:

- Alta resistencia a impactos
- Bajo costo
- Ligero
- Fácil de maniobrar
- Facilidad de modelamiento
- Extenso para recortar superficies grandes

El material cuenta con pocas desventajas que pueden ser revertidas, sin embargo, es necesarias redactarlas:

- Transportación debido a su superficie extensa
- No es impermeable
- Solo se puede pegar con silicona
- Delaminación de la cubierta de papel

Las desventajas son pocas a comparación de las ventajas del material, para asegurar el diseño de la aeronave se la pintará, así, este componente añadirá una capa extra de durabilidad y fuerza y muy poco peso al avión.



Figura 31. Foam Board.
Fuente: (Pinterest, 2019)

Se escogió este material por encima de la madera de balsa y plástico debido a su bajo costo y sus beneficios en relación a modelado, resistencia y peso. La madera de balsa es demasiado liviana, lo que favorece a la aerodinámica del avión, sin embargo, es muy frágil y tiende a romperse demasiado rápido por lo cual se debe recubrir con vinyl o materiales compuestos, sin mencionar que el costo es sumamente elevado a comparación del foam board. Con respecto al plástico, se debe usar una impresora en 3D para lo cual es necesario saber modelado en programas como Catia, Fusion 360, Autocad, entre otros, la impresión es costosa, y el modelado sumamente complicado en este tipo de software para principiantes.

3.3.2. Aeronave.

El uso del foam board para construir aviones es muy acertado debido a su bajo costo y excelente maniobrabilidad, se pueden implementar fuselajes cuadrados o circulares debido al material. Para empezar con la construcción es necesario contar con planos impresos de acuerdo al tamaño de la aeronave, generalmente en tamaño de hoja A0, se realizarán modificaciones al diseño del avión, específicamente en las alas para los montantes de los motores de levante que serán impresos en 3D, el prototipo que se va a construir contará con las siguientes especificaciones:

- Peso completo: 960 gramos
- Peso sin batería: 840 gramos
- Envergadura: 927 mm
- Área alar: 20.8 dm²
- Centro de gravedad: 51 mm detrás del borde de ataque del ala

Una vez construida la aeronave se empezará con las pruebas prácticas para la obtención de datos adicionales con respecto al aeromodelo. En la construcción del avión los componentes electrónicos que se usará son: motores brushless, controladores de velocidad electrónicos, servos, tarjeta controladora de vuelo, GPS, receptor, entre otros.

Los límites del centro de gravedad (C.G) de la aeronave son 25 milímetros anteriores y posteriores a la ubicación del C.G, esto es muy importante para

balancear los componentes electrónicos dentro del fuselaje del avión, el esfuerzo de los motores y servos aumentará y el tiempo de vuelo disminuirá si el avión no está calibrado correctamente, incluso puede que una falla así cause un accidente en vuelo.

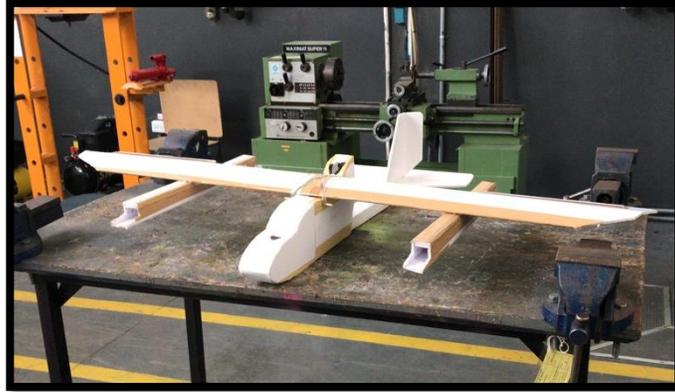


Figura 32. Avión Explorer VTOL.

3.3.3. Materiales electrónicos.

Los materiales electrónicos que se usaran en la construcción de la aeronave de despegue vertical están detallados en el Capítulo 2 – Marco teórico del escrito, sin embargo se presentara una tabla resumida con todos los componentes electrónicos.

Tabla 3
Resumen de componentes electrónicos

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PESO
MOTOR DE LEVANTE Y DE EMPUJE	Dji 960 Kv	3	50 gramos individual – 150 gramos total
CONTROLADORES DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE LEVANTE Y EMPUJE	Dji 40 Amperios	3	28 gramos individual – 84 gramos total
HÉLICES MOTORES DE LEVANTE Y EMPUJE	Dji 9060	3	20 gramos individual – 80 gramos total
CONTROLADOR DE VELOCIDAD ELECTRÓNICO CON SALIDA 5 VOLT	30 amperios	1	28 gramos
BATERÍA	2200 mAh	1	120 gramos
TARJETA CONTROLADORA DE VUELO	Pixhawk 2.4.8	1	45 gramos
SERVOS	Servo metálico 8 gramos	4	8 gramos individual – 32 gramos total

3.3.4. Planificación de construcción.

Para tener una planificación de construcción por pasos de la aeronave se realizó un flujograma detallado con cada acción para el correcto funcionamiento del avión de despegue vertical con el software de Microsoft Visio 2010.

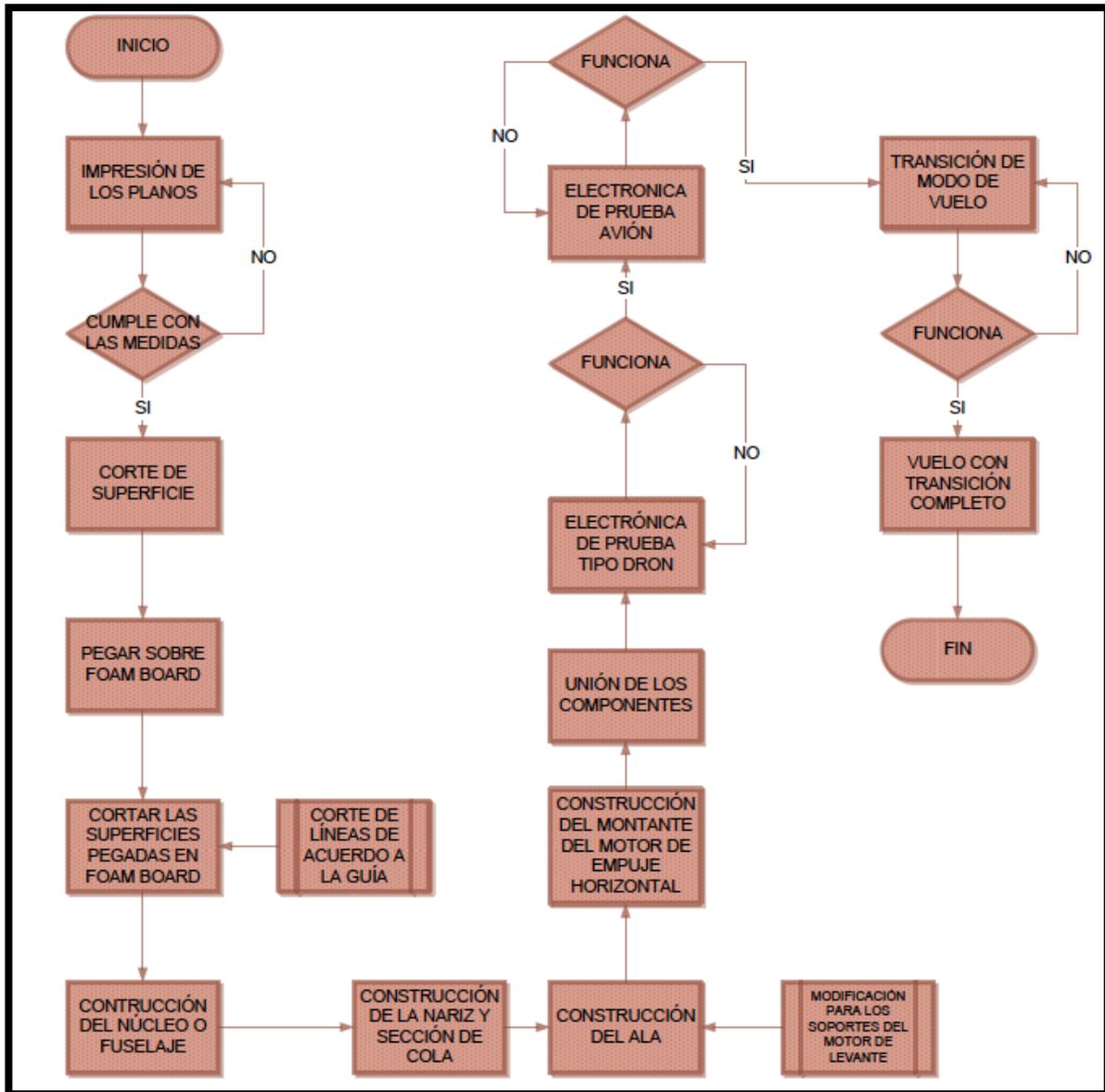


Figura 33. Flujograma de construcción.

3.3.5. Construcción del modelo.

Para la construcción del dispositivo de despegue vertical se empezó con la impresión de los planos en tamaño real y se verificó las medidas para evitar modificaciones indeseadas en el diseño del avión.



Figura 34. Planos de construcción.

Se cortó sobre las líneas de referencia y se pegó los planos en la plancha de Foam Board para posteriormente cortarlos y ensamblar la aeronave.



Figura 35. Planos cortados.

El modelo de avión que se escogió para construir es desarmable, para la facilidad de ensamblaje de la misma en caso de accidentes y optimización de

espacio en la transportación del VTOL. Se empezó con el ensamblaje del fuselaje, nariz y cola de acuerdo con el la planificación por procesos.



Figura 36. Fuselaje y sección de cola.

Para la construcción del ala es necesario hacer muchas modificaciones al diseño original con el fin que los montantes del motor entren de forma adecuada y soporten el peso entero de la aeronave.

En primer lugar se armará los montantes de los motores, es necesario imprimir el diseño en una impresora 3D obtenidos de la página web thingiverse, los montantes del motor cuentan de 2 componentes importantes, las paredes laterales donde se ubicaran los servos que transmitirán el movimiento de los motores para la transformación de modo tricóptero a avión, y el montante del motor que permite el movimiento oscilante de los mismos.

Los montantes del motor se ubicaran a una distancia de 14 cm del centro del ala. Para la colocación de los motores de levante se debe marcar la mitad de los montantes y ubicarlos junto con el centro de gravedad a 51 milímetros del borde de ataque del ala, esta acción hará que los motores delanteros mantengan el peso uniforme y no descuadre el centro de gravedad de la aeronave.

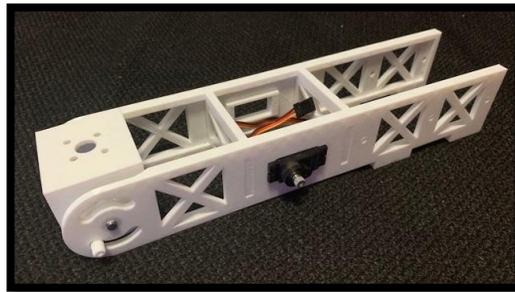


Figura 37. Montantes del motor.
Fuente: (Thingiverse, 2018)

Para terminar se ensambla el ala modificada en el fuselaje del avión con ayuda de cintas elásticas, esto generará un agarre óptimo del ala sin dejar de lado la posibilidad de retirarla para observar dispositivos electrónicos o reemplazarla en caso de ruptura, se pintó la aeronave con el fin de otorgarle un acabado mas estético y acorde a los colores de la carrera.



Figura 38. Aeronave terminada.

3.3.6. Implementación de los componentes electrónicos.

Después de terminar con la construcción del modelo de avión en foam board, se debe implementar los componentes electrónicos para que la aeronave realice el movimiento oscilante de los motores de forma adecuada, se colocarán en dos secciones, la primera, en modo dron en el cual consta el siguiente orden: controlador de vuelo, batería, receptor, motores de levante y controladores de velocidad, y la segunda sección modo avión: transición motor de empuje y servos. Se realiza el ensamblaje de esta manera con el fin de corroborar el funcionamiento adecuado de cada uno de los modos de vuelo de la aeronave.

a. Controlador de vuelo.

La computadora controladora de vuelo es el componente mas importante en la realización del proyecto, esto se debe a que regula todos los parámetros para la estabilidad del vuelo, examinando el empuje de cada motor, corrigiendo las desviaciones del VTOL en modo flotante y ayudando en la nivelación de las superficies de control en modo de empuje horizontal, por tal razón se debe proteger este componente electrónico para que no sufra daños en caso de colisión.

La computadora de vuelo Pixhawk 2.4.8 estará ubicada en la nariz del fuselaje del avión desarmable, en esta parte del avión contamos con muchos refuerzos que no permitirán que se dañe o rompa este componente. Es de suma importancia recalcar que la computadora de vuelo tiene marcada una flecha

blanca en la carcasa de los circuitos lo que indica el frente del avión, se la debe ubicar de forma adecuada para la calibración de los sensores.

En la tarjeta controladora de vuelo están conectados todos los componentes electrónicos en los pines de la parte posterior, que se divide en dos secciones, principal y auxiliar, en la conexión de los componentes electrónicos se debe tomar en cuenta la ubicación adecuada de los pines, en el diagrama de la computadora de vuelo se puede observar que el pin superior es el negativo, el intermedio positivo y el inferior señal.

En la conexión de componentes electrónicos para pruebas en tierra de aeronave tipo dron se encuentran: batería, motores de levante y controladores de velocidad electrónicos, receptor, los pines de conexión a la computadora de vuelo son los siguientes:

Tabla 4

Puertos de conexión de los motores de levante modo tricóptero

Puerto	Conexión	Sentido de rotación
Principal 1	Motor derecho delantero	Contra manecillas del reloj
Principal 2	Motor posterior	Manecillas del reloj
Principal 3	Motor izquierdo delantero	Manecillas del reloj

Fuente: (Dronecode , 2015)

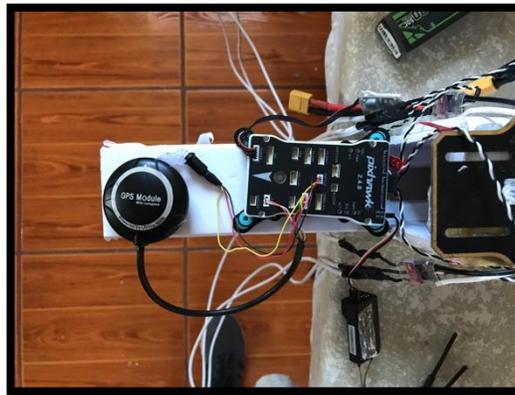


Figura 39. Pixhawk 2.4.8.

b. Batería.

La conexión de la batería en el modelo de aeronave de despegue y aterrizaje vertical es muy importante por su peso, el centro de gravedad de la aeronave debe estar ubicado a 51 milímetros del borde de ataque del ala, por tal razón se debe situar de acuerdo a este parámetro, la batería está ubicada debajo del centro de gravedad para evitar que esta ocasione algún daño en caso se moviera de una localización distinta, el tamaño de la batería es perfecto para la cavidad del fuselaje.

La batería cuenta con un conector xt60 el cual energiza la placa distribuidora de energía y con un módulo de conversión de voltaje que genera 5 voltios continuos energiza la controladora de vuelo y los demás componentes que requieren de un voltaje mas bajo y estable, gracias a los cálculos se pudo determinar el tiempo de duración promedio de la batería, es necesario que no se fuerce la misma ya que ocasionaría una falla técnica y posible colisión del avión de despegue vertical.

c. Motores de levante y controladores de velocidad electrónicos.

Los motores de levante son instalados en los 2 montantes del ala y en la parte posterior de la aeronave, en total son 3 motores que generarán el empuje necesario para el despegue y aterrizaje vertical de la aeronave, cada uno de estos componentes electrónicos es controlado a través de un controlador de velocidad electrónico (ESC), estos van conectados a una placa distribuidora de energía que envía el voltaje de la batería directamente al ESC y a la controladora de vuelo.

Después de instalar los motores y los controladores de velocidad electrónicos es necesario calibrar los ESC para que el control a través de la computadora de vuelo, sienta cuando el mando esté en posición 0% y 100% de energía, de esta manera, se podrá manejar la velocidad de la aeronave en todos los modos de vuelo. La calibración de los ESC se la realiza directamente de la plataforma de configuración qgroundcontrol.



Figura 40. Implementación motores.

d. Configuración de la computadora de vuelo de la aeronave de despegue y aterrizaje vertical

La configuración de la computadora de vuelo de la aeronave de despegue y aterrizaje vertical se hace a través del software qgroundcontrol, es de suma importancia realizar este paso con precaución ya que se deben tomar muchos parámetros en cuenta para que la aeronave pueda funcionar de forma adecuada. Se inicia la aplicación, se conecta la computadora de vuelo a través de un cable micro USB, una vez conectada la computadora de vuelo se puede acceder al menú de configuración, se carga el firmware PX4 en la computadora de vuelo Pixhawk 2.4.8, dentro de los modelos de aeronave que se pueden tomar para cargarlos dentro del dispositivo, en la parte baja se encuentra VTOL, se selecciona la opción de TILTROTOR.

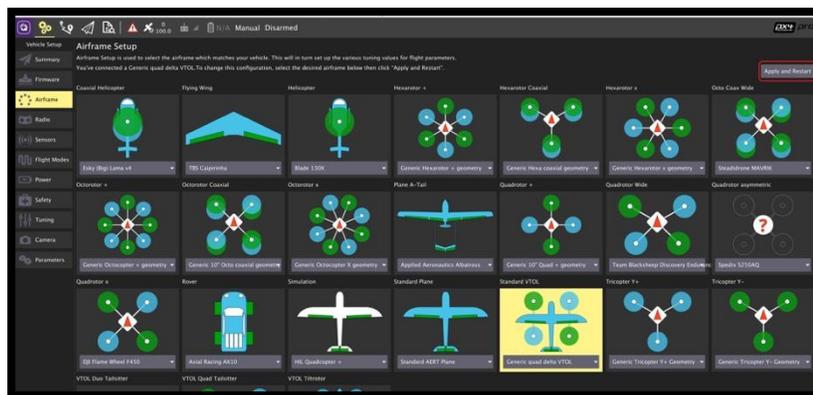


Figura 41. Configuración VTOL.

Se configuran los sensores incluidos dentro de la computadora de vuelo en el siguiente orden:

- Brújula

- Giróscopo
- Acelerómetro
- Nivelación horizonte

La configuración se realiza ubicando a la aeronave de acuerdo a la posición que muestra la pantalla y siguiendo los pasos en el programa, todas las configuraciones son parecidas. Al desconectar cualquiera de los motores o pines se tiene que volver a hacer la configuración de los sensores.

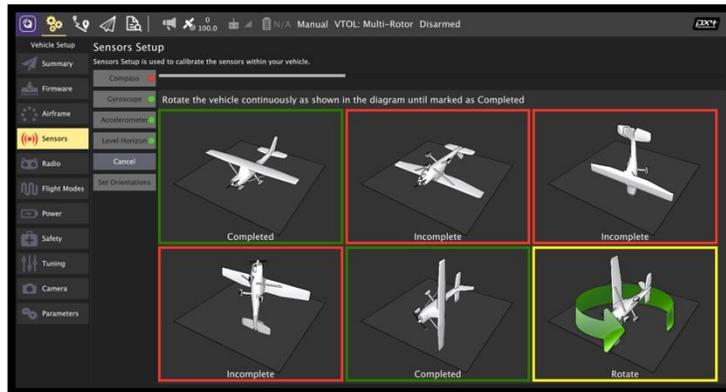


Figura 42. Configuración de sensores.

Dentro del programa debemos analizar parámetros de configuración, esta sección se encuentra en la parte baja izquierda del programa, de acuerdo al parámetro a configurar se asignan números dependiendo de la acción que se quiere realizar para activar o desactivar acciones de la aeronave, en esta sección se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 5
Parámetros de configuración VTOL

Parámetro	Valor	Descripción
FW_ARSP_MODE	Declarar inválido: 2	Se declara inválido ya que el modelo de aeronave no cuenta con sensor de aire
CBRK_AIRSPD_CHK	162128	Señal de mayor valor para que no afecte la ausencia de sensor de aire al momento de armar la aeronave
SYS_MC_EST_GROUP	EKF2	Estimador de posición
FW_THR_CRUISE	70% de empuje	El porcentaje de acelerador necesario para realizar el cambio de modo de vuelo, por seguridad se recomienda añadir 10% adicional de empuje.
VT_TRANS_MIN_TM	2 segundos	Configuración del tiempo de transición mínima en segundos, por seguridad se puede tomar un 30% adicional
VT_FW_MIN_ALT	8 metros	El riesgo de pérdida de sustentación es real, por tal razón se toma en cuenta una altura mínima de transición de modo de vuelo.

CONTINÚA →

RC_MAP_TRANS_SW	Interruptor 3	Se asigna un canal que funciona como interruptor para el cambio de modo de vuelo.
VT_B_TRANS_DUR	4 segundos	Configuración del tiempo de transición a modo dron mínima en segundos, por seguridad se puede tomar un 30% adicional
COM_DISARM_LAND	-1	Tiempo de auto desarmado después del aterrizaje

Fuente: (Dronecode, 2015)

Después de realizar la configuración de los parámetros, se puede armar la aeronave y realizar las primeras pruebas en modo dron, la aeronave se arma aplastando el interruptor de seguridad hasta que parpadee rápidamente, seguido se toma las barras controladoras del transmisor a una posición baja hasta que se encienda la luz azul en la controladora de vuelo y el interruptor se encienda con luz roja permanente. La descripción de las pruebas está descrita en el numeral 3.4.



Figura 43. Configuración VTOL.

e. Sistema de transición de vuelo y servos.

Los motores de empuje son los mismos que se usan para el levante del avión, están ubicados en los montantes del ala y generan empuje que gracias a los parámetros establecidos en el programa, la computadora de vuelo y la activación a través del control se transmite el movimiento del servo a los motores y mientras realizan la transición el motor posterior se apaga para evitar cambios en el empuje, de igual manera, los servos que controlan los elevones ubicados en cada ala se encienden para controlar la actitud del avión en modo de empuje horizontal después de cambiar el modo de vuelo.

Esta acción se realiza al mover un solo interruptor del transmisor de la aeronave, en caso que falle alguno de los componentes se puede parar la operación por completo gracias a un interruptor que corta la energía por completo llamado “killer switch”

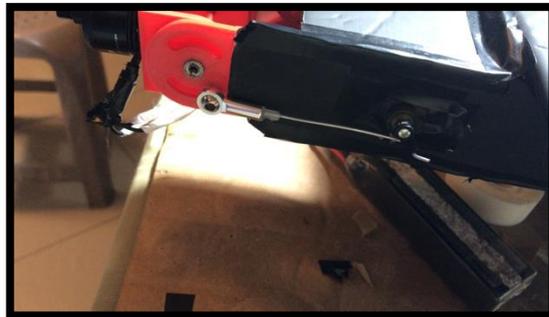


Figura 44. Mecanismo de rotación.

f. Servos

Los servos son dispositivos electrónicos que dominarán las superficies de control de la aeronave: elevones y la transición de modo de vuelo tricóptero a

vuelo horizontal explicado en el literal e. El movimiento rotacional se transmite a través de cables de acero para la superficie de control y barra de acero para los motores, la señal proviene de la computadora de vuelo de la aeronave y estos actúan en la superficie designada.

A continuación se muestra un resumen de conexión de los servos en la aeronave

Tabla 6
Puertos de conexión modo avión

Puerto	Conexión	Sentido de rotación
Principal 4	Vacío	Sin movimiento
Principal 5	Oscilante motor derecho	0 grados a 180 grados
Principal 6	Oscilante motor izquierdo	0 grados a 180 grados
Principal 7	Elevon derecho	0 grados a 180 grados
Principal 8	Elevon izquierdo	0 grados a 180 grados

Fuente: (Dronecode , 2015)

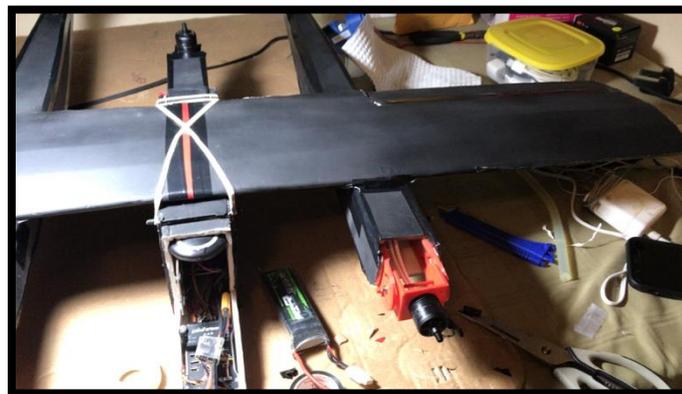


Figura 45. Implementación servos.

3.4 Pruebas.

Las pruebas que se realizaron a la aeronave de despegue y aterrizaje vertical se dividen en tres secciones, pruebas de modo dron o tricóptero, prueba en modo avión y transición de modo tricóptero a avión.

3.4.1 Prueba en modo tricóptero.

Esta prueba se realizó después de ubicar los componentes electrónicos principales, los motores de levante y la configuración de la tarjeta controladora de vuelo, se la hizo únicamente con la aeronave en tierra, sin hélices para corroborar el movimiento adecuado de los motores (tabla 4) y corregirlos en caso exista algún tipo de falla, para empezar se conecta la aeronave a la batería, una peculiaridad de la computadora de vuelo Pixhawk es el botón de seguridad que se debe aplastar antes de despegar la aeronave, una vez con el botón en posición se coloca los mandos del control en posición baja – centro hasta que la luz intermitente quede fija en color azul, después se puede usar el dispositivo con seguridad.

Se realizó una segunda prueba de campo con hélices para comprobar el modo de vuelo flotante y la dirección adecuada del empuje, de acuerdo con la prueba se determinó las siguientes fallas y soluciones:

Tabla 7
Fallas y soluciones modo Dron

FALLA	DESCRIPCIÓN	SOLUCIÓN
Aeronave no se eleva	La aeronave no se eleva a causa del sentido de rotación del motor o disposición inadecuada de la hélice	Revisión del sistema de empuje y colocación de hélices de acuerdo al sentido de rotación del motor
Falta de potencia en los motores	Los motores de levante de alcanzan la potencia requerida para elevar la aeronave	Carga de la batería
Pixhawk no permite armar el dispositivo	Emisión de luces color rojo en la computadora de vuelo Pixhawk, no permite armar el dispositivo a causa de descalibración de los sensores internos, datos inconsistentes	Calibración de los sensores de la aeronave en el programa Qgroundcontrol
Señal transmisor – receptor baja	Falta de señal, poca energía del sistema en general	Cambio de baterías en el transmisor

Después de algunas pruebas de campo, la aeronave en modo tricóptero mostró ser óptima para vuelo, sin embargo no se tomo acción debido a la falencia de conocimiento en pilotaje de aviones a control remoto.



Figura 46. Prueba modo dron.

3.4.2 Prueba en modo avión.

Una vez estabilizado el vuelo en modo dron se procedió con la instalación de los componentes electrónicos que conformarán la aeronave y el modo avión según la tabla 6, al igual que las pruebas en modo tricóptero se las realizó primero en tierra sin hélices para corroborar el sentido de giro de los motores, el empuje y el movimiento de los elevones de acuerdo al transmisor.

En la prueba de campo se determinó los siguientes problemas y soluciones:

Tabla 8
Fallas y soluciones modo avión

FALLA	DESCRIPCIÓN	SOLUCIÓN
Respuesta errónea de los servos	Al mover los mandos del control no reflejaba el movimiento en la aeronave	Verificación de circuitos y conexión adecuada de polos positivo y negativo en la computadora de vuelo.
Posición de servos errónea	Al mover el controlador de las superficies de control no lo hacían de acuerdo al mando requerido	Cambio de posición en los canales directo del receptor
Sentido de rotación del motor posterior inadecuado	Empuje del motor posterior erróneo	Revisión de hélice y sentido de rotación del motor
Pixhawk no permite armar el dispositivo	Emisión de luces color rojo en la computadora de vuelo Pixhawk, no permite armar el dispositivo a causa de descalibración de los sensores internos, datos inconsistentes	Calibración de los sensores de la aeronave en el programa Qgroundcontrol

CONTINÚA →

Señal transmisor – receptor baja	Falta de señal, poca energía del sistema en general	Cambio de baterías en el transmisor
---	---	-------------------------------------

La aeronave mostró que puede volar de forma adecuada de forma horizontal, se resolvieron los problemas y el resultado fue satisfactorio en modo avión, sin embargo no se tomo acción debido a la falencia de conocimiento en pilotaje de aviones a control remoto.

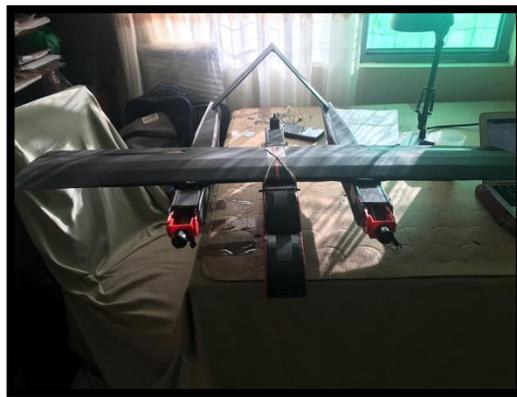


Figura 47. Prueba modo avión.

3.4.3 Transición modo tricóptero a avión

En la prueba en tierra de transición de modo tricóptero a avión se verificó el funcionamiento del interruptor para la transición de modo de vuelo, con el modelo encendido sin hélices se eleva la potencia a un mínimo del 70% para que se active esta opción, se presiona el interruptor y después de un periodo de 5 a 10 segundos se transmite el movimiento oscilante de los servos a los motores, se apaga el motor posterior y se activan los elevones, es posible mover las superficies de control, ya

que el riesgo que pérdida de sustentación es real, se realiza la transición a una altura mínima de 8 metros que puede ser cambiada de acuerdo a los parámetros, así el tiempo de respuesta de vuelta a modo dron puede variar sin afectar a la sustentación de la aeronave para un aterrizaje limpio.

En la prueba de campo se determinó las siguientes fallas y soluciones:

Tabla 9

Fallas y soluciones transición de modo de vuelo

FALLA	DESCRIPCIÓN	SOLUCIÓN
Tiempo de cambio de modo de vuelo insuficiente	Para mayor seguridad el cambio de modo de vuelo se debe realizar en un tiempo mayor a 5 segundos	Cambio de tiempo en los parámetros del programa Qgroundcontrol
Batería baja	Aviso de batería baja en vuelo, falta de respuesta de las superficies de control, riesgo de pérdida de sustentación	Aterrizaje de la aeronave y carga de la batería
Apagado motor inmediato al cambio de posición	Motores delanteros se apagan 5 segundos inmediatamente después de activar el interruptor de cambio	Verificar los valores del parámetro COM_DISARM_LAND
Funcionamiento erróneo del mecanismo de cambio de posición de los motores	Los motores delanteros no cambian su posición a gusto del usuario	Verificar los valores en los parámetros VT_B_TRANS_DUR y VT_FW_MIN_ALT

3.4.4 Peso total de la aeronave.

Al determinar el peso del alrededor de 960 gramos de la aeronave de despegue vertical incluida la batería se determinó que los motores están aptos para levantar el peso completo del avión en modo dron, cada motor sin escobillas puede llegar a cargar 350 gramos, es decir entre los tres motores con las hélices 9050 levantan un total de 1050 gramos, suficiente para maniobrar al VTOL, de igual manera, con una tracción de 710 gramos por motor, en total 1420 gramos de empuje horizontal es mas que suficiente para poder maniobrarla en modo convencional.



Figura 48. Peso del modelo.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- En la aeronave de despegue vertical el tipo de modelo de construcción más apropiado de acuerdo a las ventajas presentadas es la aeronave tricóptero, la cual presenta tres motores montados en el ala y parte posterior del fuselaje para su levante y un mecanismo de cambio de posición de los motores en la parte delantera para el modo de vuelo horizontal.
- Se construyó y se configuró la aeronave de acuerdo al modelo tricóptero a través del software de configuración de computadoras de vuelo con firmware PX4 Qgroundcontrol.
- Se realizaron pruebas prácticas en tierra con el fin de estabilizar los modos de vuelo de la aeronave y corregir errores que pueden ocurrir al momento de usar el avión de despegue y aterrizaje vertical.
- Se calibraron los sensores de brújula, giróscopo y acelerómetro a través del software de configuración Qgroundcontrol para tener mayor estabilidad de la aeronave en vuelo.
- La aeronave de despegue y aterrizaje vertical es una herramienta que podrá ser usada por los docentes y estudiantes de la Unidad de Gestión de Tecnologías, así como por las personas pertenecientes al club de aeromodelismo de la institución con el fin de aprender.

4.2. Recomendaciones

- Se debe usar la aeronave en condiciones óptimas, con bajo viento y dentro de los parámetros de tiempo establecidos en este documento a manos de personas con conocimientos previos para evitar colisión y daños en la aeronave y componentes electrónicos.
- Para configurar los distintos tipos de sensores de la aeronave se debe apoyar el VTOL en una superficie completamente plana para evitar lecturas erróneas del sistema.
- Evitar golpes en la aeronave ya que puede causar desestabilización del sistema y colisión de la aeronave de despegue vertical.
- Verificar el voltaje de carga de la batería y del transmisor para evitar percances y daños en el avión, batería o receptor.
- Realizar pruebas en tierra de verificación del mecanismo de transformación de modo de vuelo de la aeronave de despegue vertical antes de cada uso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amazon . (2018). Control de vuelo KK2. Recuperado el 30 de Jul de 2019, de <https://www.amazon.com/DJI-E305-2312E-Motor-960kv/dp/B072Q74SKL>
- Amazon. (2018). Motor brushless 2312e. Recuperado el 8 de Jul de 2019, de <https://www.amazon.com/DJI-E305-2312E-Motor-960kv/dp/B072Q74SKL>
- Barzallo, J. (2018). Desarrollo y Construcción de un Vehículo Aéreo No Tripulado de Despegue y Aterrizaje Vertical. Trabajo de titulación , Universidad San Francisco de Quito , Quito .
- Bell. (2017). Bell Boeing V-22 Osprey. Recuperado el 8 de Junio de 2019, de <https://www.bellflight.com/products/bell-boeing-v-22>
- BOEING. (2000). Boeing X-32. Recuperado el 5 de Junio de 2019, de <https://www.boeing.com/history/products/x-32-joint-strike-fighter.page>
- Dirección General de Aviación Civil . (23 de Marzo de 2010). Dirección General de Aviación Civil . Recuperado el 5 de Mayo de 2019, de RDAC 001 - Definiciones y Abreviaturas : <http://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/10/1.-RDAC-Parte-00123-Mar-10.pdf>
- Dirección General de Aviación Civil. (23 de Marzo de 2010). Dirección General de Aviación Civil. Recuperado el 22 de Julio de 2019, de RDAC 001: definiciones y abreviaturas: <https://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/06/1.-RDAC-Parte-00123-Mar-10-1.pdf>
- Dirección Nacional de Aeronavegabilidad. Circular de Asesoramiento CA 120-27B

- Drone. (2018). Drone Paso a Paso. Recuperado el 30 de Jul de 2019, de <https://dronepasoapaso.000webhostapp.com/2017/08/27/cambio-de-cuadro-para-el-drone/>
- Dronecode . (3 de Agosto de 2015). Pixhawk . Recuperado el 30 de Julio de 2019, de Configuración quadplane : https://docs.px4.io/v1.9.0/en/frames_vtol/vtol_quadplane_fun_cub_vtol_pixhawk.html
- Dronecode. (2015). Configuración VTOL . Recuperado el 1 de Agosto de 2019, de Parámetros para volar sin sensor de aire : https://docs.px4.io/v1.9.0/en/config_vtol/vtol_without_airspeed_sensor.html
- Dronpedia. (18 de Nov de 2015). Youtube. Recuperado el 25 de Junio de 2019, de Motores Brushless: <https://www.youtube.com/watch?v=tgrFtos9-Sg>
- Federal Aviation Administration. (s.f.). Federal Aviation Administration. Recuperado el 3 de Julio de 2019, de Aerodynamics of flight: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/07_phak_ch5.pdf
- FLITE TEST. (2015). FT Explorer . Recuperado el 17 de Mayo de 2019, de Construcción FT Explorer : <https://www.flitetest.com/articles/ft-explorer-build>
- Flite Test. (2018). Foro Flite Test. Recuperado el 3 de Sep de 2019, de <https://forum.flitetest.com/index.php?threads/new-vtol-concept-hybrid-airplane-tricopter.6616/>

- FlySky. (2018). Receptor FS IA6. Recuperado el 10 de Junio de 2019, de <https://www.amazon.es/Flysky-Control-Receptor-Compatible-Transmisor/dp/B01AJ2HXUS>
- FlySky. (2018). Transmisor. Recuperado el 15 de Junio de 2019, de <https://www.flysky-cn.com/>
- MOBUS. (2018). Controlador de Velocidad electrónico. Recuperado el 30 de Junio de 2019, de <https://mobus.es/blog/esc-para-drones-para-que-sirven/>
- NASA. (1981). NASA. Recuperado el 3 de Junio de 2019, de BELL XV - 15 TILTROTOR: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/XV-15/ECN-13850.html>
- Overstreet, J. (2018 de Agosto de 2014). Flite test . Recuperado el 22 de Julio de 2019, de ¿Que es un circuito eliminador de batería?: <https://www.flitetest.com/articles/what-is-a-battery-eliminator-circuit>
- Pinterest. (2019). Imagenes de aeromodelismo . Recuperado el 25 de Junio de 2019, de <https://www.pinterest.es/paragerardo2000/aeromodelismo/>
- Pixhawk. (2016). Pixhawk. Recuperado el 2019, de Pixhawk 2.4.8: <https://pixhawk.org/>
- RCMART. (2018). Motor brushless 2212. Recuperado el 30 de Junio de 2019, de <http://www.myrcmart.com/rcx-2212-920kv-brushless-motor-for-dji-style-prop-ccw-p-8028.html>
- Real Academia Española . (2018). Real Academia Española . Recuperado el 5 de Mayo de 2019, de Diccionario de la Real Academia Española : <https://dle.rae.es/?id=OiEGmq4>

- Robocraft. (2018). Recuperado el 30 de Jul de 2019, de <https://robocraft.co.in/shop/drones/pixhawk-px4-2-4-8-32-bit-flight-controller/>
- Thingiverse. (2018). Mecanismo VTOL. Recuperado el 4 de Sep de 2019, de <https://www.thingiverse.com/thing:3336223>
- Thompson, L. (13 de Marzo de 2017). Forbes . Obtenido de Forbes : <https://www.forbes.com/sites/lorenthompson/2017/03/13/versatile-v-22-osprey-is-the-most-successful-new-combat-system-since-9-11/#3b4e3fc62639>
- Wild, F. (24 de Septiembre de 2018). NASA. Recuperado el 22 de Julio de 2019 , de ¿Qué es la NASA?: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-is-nasa-k4.html>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aerodino: Aeronave más pesada que el aire que se sostiene en vuelo principalmente en virtud de las fuerzas aerodinámicas. (Dirección General de Aviación Civil, 2010)

Aeronave: Toda máquina que puede sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra. (Dirección General de Aviación Civil, 2010)

BEC: circuito eliminador de batería, esta diseñado para controlar un voltaje alto de batería a uno mas bajo, permite energizar servos, recibidor y otros componentes sin la necesidad de usar una fuente de energía distinta. (Overstreet, 2014)

CG: centro de gravedad, el **centro de gravedad** de un cuerpo es el punto donde se encuentra aplicada la resultante de la suma de todas las fuerzas gravitatorias que actúan sobre cada una de las partículas del mismo. (Dirección Nacional de Aeronavegabilidad)

ESC: controlador de velocidad electrónico, es un circuito electrónico que controla y regula la velocidad de un motor eléctrico.

FPV: visión en primera persona, pilotar un aeromodelo desde la perspectiva del aparato a través de una cámara.

GHz: gigahercio, unidad de medida de frecuencia.

Glow Plug: motor a combustión de dos tiempos usado en modelismo radio controlado.

KV: referido a las revoluciones por minuto constantes de un motor al aplicarle un voltio de energía.

LiPo: polímero – litio, tipo de batería generalmente usada en dispositivos de aeromodelismo radio controlado.

mAh: miliamperio – hora, medida de almacenamiento de carga de una batería.

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio, empezó en 1958 como parte del gobierno de los Estados Unidos de América. La NASA esta a cargo de la ciencia y tecnología con respecto a aeronaves o el espacio. (Wild, 2018)

PCM: modulación por impulsos codificados

PDB: tarjeta distribuidora de energía

PPM: modulación por posición de pulsos

PWM: modulación por ancho de pulsos

RC: radio control

UAV: vehículo aéreo no tripulado.

VTOL: despegue y aterrizaje vertical

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE

EXTENSIÓN LATACUNGA

MECÁNICA AERONÁUTICA MENCIÓN AVIONES

CERTIFICACIÓN

Se certifica que la presente monografía fue desarrollada por el Señor Paredes Díaz, Francisco Javier Luis bajo mi supervisión.

Aprobado por:


ING. MUÑOZ STALIN
DIRECTOR DEL PROYECTO


ING. BAUTISTA RODRIGO
DIRECTOR DE LA CARRERA


ABG. SARITA PLAZA
SECRETARIA ACADÉMICO


UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
SECCIÓN ADMISIÓN Y REGISTRO
1922 ECUADOR


UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
C.C. FARRABRAS U. LATACUNGA
1922 ECUADOR