



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## UNIDAD DE GESTIÓN DE TECNOLOGÍAS

**Montaje del sistema de propulsión de un dron, en base a las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4, para la carrera de Mecánica Aeronáutica de la Unidad de Gestión de Tecnologías – ESPE**

Molina Cando, Alex Fernando

Departamento de Ciencias Espaciales

Carrera de Mecánica Aeronáutica mención Aviones

Monografía previo a la obtención del título de Tecnólogo en Mecánica Aeronáutica mención Aviones

Ing. Coello Tapia, Luis Ángel

03 de agosto de 2020



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES**  
**CARRERA DE MECÁNICA AERONÁUTICA MENCIÓN AVIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“Montaje del sistema de propulsión de un drone, en base a las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4, para la carrera de Mecánica Aeronáutica de la Unidad de Gestión de Tecnologías - ESPE”** fue realizado por el señor **Molina Cando, Alex Fernando** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 03 de agosto de 2020

Firma:



**Ing. Coello Tapia Luis Angel**

C.C.: 0503128662

**Document Information**

---

**Analyzed document** MOLINA CANDO ALEX FERNANDO.pdf (D77425111)  
**Submitted** 8/3/2020 8:50:00 PM  
**Submitted by**  
**Submitter email** afmolina1@espe.edu.ec  
**Similarity** 7%  
**Analysis address** lacoello.espe@analysis.arkund.com

**Sources included in the report**

---

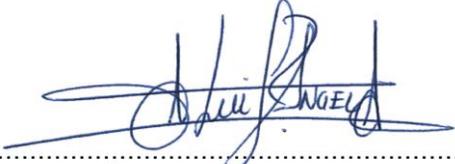
**W** URL: [https://susonieto2008.wixsite.com/misitio/single-post/2017/10/28/CONOCIMIENTO-GENE ...](https://susonieto2008.wixsite.com/misitio/single-post/2017/10/28/CONOCIMIENTO-GENE...)  **23**  
Fetched: 4/6/2020 7:56:02 PM

---

**W** URL: [https://docplayer.es/81574170-Universidad-de-san-carlos-de-guatemala-facultad-de-i ...](https://docplayer.es/81574170-Universidad-de-san-carlos-de-guatemala-facultad-de-i...)  **2**  
Fetched: 10/22/2019 3:55:02 PM

---

Firma:



Ing. Coello Tapia Luis Angel  
DIRECTOR



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES**  
**CARRERA DE MECÁNICA AERONÁUTICA MENCIÓN AVIONES**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Molina Cando, Alex Fernando**, con cédula de ciudadanía nº 0503655235, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Montaje del sistema de propulsión de un dron, en base a las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4, para la carrera de Mecánica Aeronáutica de la Unidad de Gestión de Tecnologías-ESPE** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 03 de agosto de 2020

Firma:

.....  
**Molina Cando Alex Fernando**

C.C.: 0503655235



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ESPACIALES**  
**CARRERA DE MECÁNICA AERONÁUTICA MENCIÓN AVIONES**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Molina Cando, Alex Fernando**, con cédula de ciudadanía nº 0503655235, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Montaje del sistema de propulsión de un drone, en base a las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4, para la carrera de Mecánica Aeronáutica de la Unidad de Gestión de Tecnologías - ESPE** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 03 de agosto de 2020

Firma:

.....  
**Molina Cando Alex Fernando**

C.C.: 0503655235

## DEDICATORIA

La educación es la principal herramienta que posee el ser humano para enfrentar las travesías de la vida. Y al culminar una etapa de este largo pero no imposible proceso de obtención de sabiduría, valores y experiencia, es cuando uno siente que nunca estuvo solo, pues siempre hay alguien que nos acompaña de una u otra manera para impulsarnos a cumplir nuestros sueños. Por ello dedico esta gran victoria:

A Dios, quien cada día siembra en mi alma el amor y la fuerza de voluntad para enfrentar cada situación de la vida y levantarme después de un tropiezo.

A mis padres, Trajano Molina y Bertha Cando quienes son los pilares fundamentales de mi vida, que desde mi existencia me han regalado todo su amor, confianza y constante apoyo para hacer de mí un hombre humilde, perseverante, responsable y con ímpetu de superación.

A mis hermanos, Julio, Mirian y Marisol que gracias a sus consejos y cuidados de hermanos mayores han velado por mi bienestar, compartiendo conmigo una gran parte de sus experiencias.

Todo es posible gracias a ellos.

Alex Fernando Molina Cando

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi sincero agradecimiento a las personas que de distinta manera influyeron a lo largo del camino que tuve que recorrer para que la realización y finalización de este trabajo de titulación fuera posible.

A la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE que gracias a sus docentes he logrado obtener el aprendizaje necesario y de gran beneficio para mi vida profesional.

Al Ingeniero Luis Coello que como tutor académico me brindó su asesoramiento durante toda la elaboración de este proyecto.

A mi familia que constantemente me apoyaron de forma moral y económica durante todos estos años de estudio.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CARÁTULA .....</b>	<b>1</b>
<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA .....</b>	<b>4</b>
<b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>6</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>16</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>18</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>18</b>
1.1. Antecedentes .....	18
1.2. Planteamiento del problema .....	19
1.3. Justificación e Importancia .....	20
1.4. Objetivos .....	21
1.4.1. Objetivo General .....	21
1.4.2. Objetivos Específicos .....	21
1.5. Alcance .....	22
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>23</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1. Generalidades de los RPA o Drones .....	23
2.1.1. Definición de dron e .....	24

2.1.2. Usos de un drone.....	25
2.1.3. Partes básicas de un drone.....	31
2.1.4. Clasificación de los drones.....	35
2.1.5. Características técnicas de un drone.....	39
2.1.6. Normativa de operación de drones en el Ecuador.....	44
2.2. Drone cuadricóptero T4.....	48
2.2.1. Diseño estructural.....	48
2.2.2. Sistema de propulsión.....	51
2.2.3. Sistema de control.....	59
2.3. Grupo motopropulsor.....	60
2.3.1. Motores.....	60
2.3.2. Hélices.....	67
2.3.3. ESC's.....	74
2.4. Fuente de alimentación.....	78
2.4.1. Tipos de baterías.....	80
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>84</b>
<b>DESARROLLO DEL TEMA.....</b>	<b>84</b>
3.1. Descripción general.....	84
3.2. Implementación del sistema de propulsión.....	85
3.2.1. Estudio de alternativas.....	85
3.2.2. Matriz de decisión.....	91
3.2.3. Descripción de componentes.....	93
3.3. Interacción de los sistemas del cuadricóptero T4.....	102
3.3.1. Sistema de propulsión.....	103
3.4. Proceso de ensamblaje.....	104
3.4.1. Estructura del cuadricóptero T4.....	105

3.4.2. Montaje del sistema de propulsión.....	107
3.5. Descripción de procedimientos de calibración y mantenimiento .....	114
3.5.1. Calibración del acelerador y programación.....	115
3.5.2. Troubleshooting .....	117
3.6. Análisis de resultados .....	119
3.6.1. Pruebas funcionales .....	119
3.6.2. Pruebas operacionales.....	121
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>126</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>126</b>
4.1. Conclusiones.....	126
4.2. Recomendaciones .....	127
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>128</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>133</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>134</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>139</b>
ANEXO A: Manual de operación del cuadricóptero T4.....	140
ANEXO B: Manual de mantenimiento del cuadricóptero T4.....	140
ANEXO C: Manual de seguridad del cuadricóptero T4.....	140
ANEXO D: Manual de usuario ESC AIR20A.....	140

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b>	Parámetros MT2213-935KV MultiStar motor .....	86
<b>Tabla 2</b>	Parámetros T-Motor AIR2213 920KV .....	88
<b>Tabla 3</b>	Parámetros 880KV MOTOR AC2836-358 .....	90
<b>Tabla 4</b>	Criterios de evaluación .....	92
<b>Tabla 5</b>	Especificaciones del motor AIR2213 920KV.....	94
<b>Tabla 6</b>	Especificaciones del ESC AIR20A .....	98
<b>Tabla 7</b>	Especificaciones de la batería LiPo Turnigy 5000 mAh .....	100
<b>Tabla 8</b>	Especificaciones del módulo PDB-XT60.....	101
<b>Tabla 9</b>	Troubleshooting del ESC AIR20A .....	118
<b>Tabla 10</b>	Análisis de prueba funcional.....	119
<b>Tabla 11</b>	Análisis de prueba operacional número 1 .....	122
<b>Tabla 12</b>	Análisis de prueba operacional número 2.....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	RPA o Drone .....	23
<b>Figura 2</b>	Drone operado a distancia.....	25
<b>Figura 3</b>	Drone para fumigación .....	26
<b>Figura 4</b>	Drone para fotografía y video .....	27
<b>Figura 5</b>	Drone topográfico .....	28
<b>Figura 6</b>	Drones de carrera .....	29
<b>Figura 7</b>	Drone recreativo .....	29
<b>Figura 8</b>	Drone para mensajería .....	30
<b>Figura 9</b>	Drone militar.....	31
<b>Figura 10</b>	Motor y hélice.....	32
<b>Figura 11</b>	Controlador de vuelo .....	32
<b>Figura 12</b>	Mando a distancia.....	33
<b>Figura 13</b>	Radio receptor .....	34
<b>Figura 14</b>	Batería.....	34
<b>Figura 15</b>	Clasificación de los drones .....	35
<b>Figura 16</b>	RPA tipo avión .....	36
<b>Figura 17</b>	RPA tipo helicóptero .....	37
<b>Figura 18</b>	RPA tipo multirotor.....	38
<b>Figura 19</b>	Drone de juguete .....	40
<b>Figura 20</b>	Drone de gama media .....	41
<b>Figura 21</b>	Altura de vuelo de un drone .....	42
<b>Figura 22</b>	Rango de operación .....	43
<b>Figura 23</b>	RPA con autonomía de 20min.....	44
<b>Figura 24</b>	Resolución No 251/2015 .....	45

<b>Figura 25</b>	Cuadricóptero T4 .....	48
<b>Figura 26</b>	Brazo tubular .....	49
<b>Figura 27</b>	Pieza central .....	49
<b>Figura 28</b>	Estructura del cuadricóptero T4 .....	50
<b>Figura 29</b>	Rotación de hélices.....	52
<b>Figura 30</b>	Torque de un helicóptero.....	53
<b>Figura 31</b>	Ejes de movimiento.....	54
<b>Figura 32</b>	Control de altura .....	55
<b>Figura 33</b>	Control del yaw .....	56
<b>Figura 34</b>	Control del roll.....	57
<b>Figura 35</b>	Control del pitch .....	58
<b>Figura 36</b>	Grupo motopropulsor de un drone .....	60
<b>Figura 37</b>	Motores eléctricos Brushed .....	62
<b>Figura 38</b>	Interior de un motor Brushed.....	63
<b>Figura 39</b>	Motores eléctricos Brushless.....	64
<b>Figura 40</b>	Interior de un motor Brushless .....	65
<b>Figura 41</b>	Motor Brushless Inrunner .....	66
<b>Figura 42</b>	Motor Brushless Outrunner .....	66
<b>Figura 43</b>	Hélices para drone.....	67
<b>Figura 44</b>	Hélices contrarrotatorias.....	68
<b>Figura 45</b>	Ángulo de ataque.....	69
<b>Figura 46</b>	Paso de la hélice.....	70
<b>Figura 47</b>	Hélice de medida 23x12 .....	70
<b>Figura 48</b>	Hélices de dos palas.....	71
<b>Figura 49</b>	Hélices de tres y cuatro palas .....	72
<b>Figura 50</b>	Hélices de plástico.....	72

<b>Figura 51</b>	Hélices de fibra de carbono.....	73
<b>Figura 52</b>	Hélices de madera.....	73
<b>Figura 53</b>	Hélice compuesta de nylon y fibra de carbono.....	74
<b>Figura 54</b>	Partes del ESC.....	76
<b>Figura 55</b>	ESC's para baterías 3S.....	77
<b>Figura 56</b>	ESC's para baterías 4S.....	78
<b>Figura 57</b>	Batería recargable para drones.....	79
<b>Figura 58</b>	Batería de Ni-Cd.....	80
<b>Figura 59</b>	Batería de Ni-MH.....	81
<b>Figura 60</b>	Batería de Ion-Li.....	82
<b>Figura 61</b>	Batería de Li-Po.....	83
<b>Figura 62</b>	Estructura del drone cuadricóptero T4.....	85
<b>Figura 63</b>	MT2213-935KV MultiStar motor.....	87
<b>Figura 64</b>	T-Motor AIR2213 920KV.....	89
<b>Figura 65</b>	880KV MOTOR AC2836-358.....	91
<b>Figura 66</b>	T-Motor AIR 350 Multirotor Kit.....	93
<b>Figura 67</b>	Motores AIR2213 920KV.....	95
<b>Figura 68</b>	Dimensiones del Motor AIR2213 920KV.....	95
<b>Figura 69</b>	Especificaciones de rendimiento del motor AIR2213 920KV.....	96
<b>Figura 70</b>	Hélices T9545.....	97
<b>Figura 71</b>	ESC AIR20A 3-4S LiPo.....	99
<b>Figura 72</b>	Batería LiPo Turnigy 5000 mAh.....	100
<b>Figura 73</b>	Módulo PDB-XT60.....	102
<b>Figura 74</b>	Interacción de los sistemas del cuadricóptero T4.....	103
<b>Figura 75</b>	Proceso de ensamblaje del cuadricóptero T4.....	105
<b>Figura 76</b>	Componentes estructurales del drone.....	106

<b>Figura 77</b>	Estructura ensamblada.....	107
<b>Figura 78</b>	Cableado.....	108
<b>Figura 79</b>	Motor en el brazo estructural.....	108
<b>Figura 80</b>	Sujeción del motor .....	109
<b>Figura 81</b>	Brazos asegurados en el cuerpo.....	109
<b>Figura 82</b>	Cinta doble faz .....	110
<b>Figura 83</b>	ESC's adheridos .....	110
<b>Figura 84</b>	Cableado de los ESC's.....	111
<b>Figura 85</b>	Conexión del módulo de energía.....	112
<b>Figura 86</b>	Instalación de las hélices.....	113
<b>Figura 87</b>	Sistema de propulsión ensamblado .....	113
<b>Figura 88</b>	Proceso de calibración y mantenimiento .....	114
<b>Figura 89</b>	Especificaciones del ESC AIR20A .....	115
<b>Figura 90</b>	Cableado del ESC al motor .....	116
<b>Figura 91</b>	Prueba funcional del drone.....	120
<b>Figura 92</b>	Prueba funcional del radiocontrol.....	121
<b>Figura 93</b>	Prueba operacional número 1 .....	123
<b>Figura 94</b>	Prueba operacional número 2 .....	125

## RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objeto principal la realización del montaje de un sistema de propulsión sobre una estructura de fibra de carbono de un dron, creada a partir de una impresión 3D y en base a las especificaciones técnicas de un cuadricóptero T4.

Durante el montaje del sistema de propulsión; para el grupo motopropulsor se utilizaron 4 motores eléctricos brushless (motores sin escobillas), 4 hélices y 4 controladores de velocidad electrónico; y para la fuente de alimentación se instaló un módulo de energía (placa con circuitos integrados) y una batería LiPo de 5000 mAh. Con estos componentes se obtiene la fuerza de sustentación y empuje necesario, que en interacción con el sistema de control, le permiten al dron sustentarse en el aire y realizar los movimientos de vuelo principales que rigen en las aeronaves, como son el yaw (guiñada), roll (balanceo) y pitch (cabeceo) en sus ejes vertical, longitudinal y transversal, respectivamente. Por ende, gracias al montaje, calibración y realización de pruebas, tanto funcionales como operacionales de todos los componentes de los sistemas, el dron cuadricóptero T4 se encuentra en condiciones óptimas para que el usuario pueda realizar operaciones de vuelo manual totalmente seguras, lo cual la convierte en una aeronave cien por ciento aeronavegable.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **CUADRICÓPTERO T4**
- **SISTEMA DE PROPULSIÓN**
- **MOTOR BRUSHLESS**
- **MONTAJE**
- **SUSTENTACIÓN**

## ABSTRACT

The present research has as main objective to install a propulsion system on a carbon fibre structure of a drone, created from a 3D print and based on the technical specifications of a T4 quadricopter. During the assembly of the propulsion system; 4 brushless electric motors (motors without brushes), 4 propellers and 4 electronic speed controllers were used for the motor group; and for the power supply a power module (board with integrated circuits) and a 5000 mAh LiPo battery were installed. With these components, the necessary lift and thrust force is obtained, which in interaction with the control system, allows the drone to sustain itself in the air and perform the main flight movements that govern the aircraft, such as yaw, roll and pitch in its vertical, longitudinal and transversal axes, respectively. Therefore, thanks to the assembly, calibration and testing, both functional and operational, of all system components, the T4 quadricopter drone is in optimal conditions for the user to perform totally safe manual flight operations, making it a one hundred percent airworthy aircraft.

### KEYWORDS:

- **QUADRICOPTER T4**
- **PROPULSION SYSTEM**
- **BRUSHLESS MOTOR**
- **ASSEMBLY**
- **LIFT**

**CHECKED BY:** \_\_\_\_\_

**LIC. MARIA ELISA COQUE**

**DOCENTE UGT**

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Antecedentes

La Unidad de Gestión de Tecnologías (UGT) perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, fue creada el 8 de abril de 2014, la cual entro en funcionamiento para reemplazar al ex Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico (ITSA) de la ciudad de Latacunga, y actualmente se encuentra avalada y certificada por la Dirección General de Aviación Civil del Ecuador. La UGT ESPE es una institución encauzada a la enseñanza de materias enfiladas a la logística, seguridad aérea, electrónica, y al mantenimiento de aeronaves, apoyados en material técnico de sus múltiples laboratorios promoviendo el aprendizaje a través de prácticas.

En la Unidad de Gestión de Tecnologías, hasta la presente fecha, no existen drones disponibles para los estudiantes que se encuentran en su período de formación profesional, que puedan ser utilizados como medio de demostración de los principios aerodinámicos. Los drones o también conocidos como aeronaves pilotadas de forma remota, son aeronaves no tripuladas que se controlan desde largas distancias. El término drone etimológicamente se refiere a la abeja macho, debido a que la palabra dron viene del inglés drone, cuyo significado original era zángano (macho de la abeja reina). Por tanto, debido a esta referencia y a la similitud entre estos aparatos con el zumbido y movimientos semejantes a los de una abeja, que en noviembre de 1946, se documentó por primera vez a la palabra drone como un avión no tripulado con muchas potencialidades civiles y militares, en una publicación en inglés llamada Popular Science, la cual fue fundada en el año de 1872.

Los drones o RPA (Aeronave Pilotada Remotamente) son herramientas tecnológicas que han evolucionado con el paso de los años, donde el uso militar es uno de los principales autores que están detrás de su desarrollo tecnológico. En su siglo y medio de historia, estas máquinas han sido empleadas para bombardear, espiar y confundir al enemigo. Utilizados durante enfrentamientos como la Primera Guerra Mundial, la Segunda Guerra Mundial, la Guerra de Vietnam, etc. Pero a pesar de haber sido utilizados para fines destructivos, significó un gran avance respecto a sus diseños, desempeño y usos, lo cual condujo a que en el año 2006 la FAA reconociera el potencial de los drones y emitiera permisos comerciales. Y consecuentemente en el año 2010 la compañía francesa Parrot lanzó su Parrot AR Drone, el primer drone listo para volar que se puede controlar completamente a través de Wi-Fi, usando un Smartphone.

## **1.2. Planteamiento del problema**

La Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, al ser el único centro de Educación Superior de Aeronáutica en el Ecuador y al encontrarse en pleno auge de crecimiento a nivel nacional e internacional, actualmente no dispone de una aeronave pilotada de forma remota (drone) que esté a la predisposición de los estudiantes de la carrera de Mecánica Aeronáutica y por tanto la ausencia de interacción con esta herramienta tecnológica dificulta su proceso de aprendizaje.

La falta de disponibilidad de un drone tipo cuadricóptero dentro de la institución, exclusivo para uso estudiantil, imposibilita el desarrollo profesional práctico de los estudiantes. Ya que no se puede presenciar los principios de funcionamiento que rigen en este tipo de aeronave y en la aeronáutica en general, dificultando así la oportunidad de encontrarse en un entorno real de funcionamiento y aplicación de conocimientos al constatar directamente el vuelo de un drone.

Un efecto a futuro de la falta de interacción con este tipo de aeronaves pilotadas de forma remota (drone) se concreta en el posterior accionar de los estudiantes, durante el ejercicio de su vida profesional, quienes encontrarían dificultades mayores al realizar operaciones de control aerodinámico, investigación y fabricación de drones, a diferencia de una persona que manipuló, analizó y se haya instruido con este tipo de aeronaves, y que se encuentra con una mayor predisposición para la aplicación de los conocimientos que se apoyan en la confianza obtenida durante la utilización y educación con drones.

### **1.3. Justificación e Importancia**

En la actualidad y en el futuro la integración de aeronaves pilotadas de forma remota (drones) para distintas finalidades, implica una gran relevancia e importancia para aquellos técnicos aeronáuticos que tengan conocimientos respecto a este tema y que puedan innovar en la creación de nuevas máquinas aeronavegables, o nuevas tecnologías que involucren a los mismos.

El montaje de un sistema de propulsión a un drone tipo cuadricóptero T4, le permitirá a esta máquina poder sustentarse en el aire, aplicar los conocimientos de electrónica, teoría de motores y aerodinámica en el funcionamiento de los motores eléctricos, y verificar cada parámetro que posibilite el vuelo del drone. Con esto se tendrá disponible dentro de la institución una herramienta totalmente funcional y aeronavegable, indispensable para constatar de manera teórica y práctica la interacción del aire con los perfiles aerodinámicos de los motores, además de poder controlar cada motor del drone para generar sus movimientos principales.

Los beneficiarios directos del propósito de este proyecto son los estudiantes de la carrera de Mecánica Aeronáutica pertenecientes a la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ubicada en la ciudad de

Latacunga. Los estudiantes para mejorar su rendimiento y obtener mayor experiencia, podrán manipular esta aeronave cuando deseen, verificar los principios teóricos impartidos por los docentes y a la vez, también, servirá de punto de partida para futuras investigaciones. Lo cual hace de este proyecto un medio factible donde se beneficiarán todos y se engrandecerá la calidad de profesionales que aporta la Universidad a la sociedad.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo General**

Realizar el montaje del sistema de propulsión de un dron, en base a las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4, para la Carrera de Mecánica Aeronáutica de la Unidad de Gestión de Tecnologías - ESPE.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Recopilar información técnica referida a sistemas de propulsión empleados en drones, que permitan conocer los principios básicos de funcionamiento que rigen en los mismos.
- Seleccionar los componentes para el sistema de propulsión del dron, para que cumplan con las prestaciones técnicas necesarias.
- Implementar un sistema de propulsión al dron, acorde a las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4 y en base a un diseño adecuado, para su correcto funcionamiento y desempeño.
- Analizar el desempeño del sistema de propulsión, a través de pruebas funcionales y operacionales, en base a las especificaciones del cuadricóptero T4.

### **1.5. Alcance**

El presente proyecto tiene como finalidad realizar el montaje del sistema de propulsión de un dron cumpliendo con las especificaciones técnicas de un cuadricóptero T4, para generar la fuerza de sustentación y empuje necesario que le permita volar a este tipo de aeronave. El trabajo va dirigido tanto a docentes como a estudiantes de la Carrera de Mecánica Aeronáutica de la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, para que hagan uso del mismo a través de la familiarización y manipulación del dron, haciendo posible un desarrollo y desenvolvimiento teórico-práctico durante la instrucción profesional de los estudiantes.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Generalidades de los RPA o Drones

“Las siglas RPA vienen del inglés Remotely Piloted Aircraft, que viene a ser traducido como aeronave pilotada remotamente. Con esta palabra se refiere a un subconjunto de vehículos aéreos no tripulados (VANT) o en inglés UAV (Unmanned Aerial Vehicle), generalmente conocidos como drones” (Vergara, y otros, 2016, pág. 3). Este tipo de aparatos tecnológicos pueden volar de manera autónoma, cuando ocupan sistemas de vuelo asistidos o también conocidos como piloto automático, y también pueden volar controlados por una persona a la distancia, es decir, de manera remota.

#### Figura 1

*RPA o Drone*



*Nota:* El gráfico muestra un drone convencional equipado con una cámara que cualquier persona puede adquirirlo y volarlo. Tomado de (Induambiente, 2019).

Desde su origen hasta la actualidad los RPA o Drones han tenido un gran crecimiento tecnológico y mucho interés por parte de las personas, civiles y militares, es por ello que en los últimos años la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), específicamente desde el año 2005 ha venido regularizando la operación de este tipo de aeronaves para garantizar la seguridad e interoperabilidad con las demás clases de aeronaves que surcan los cielos.

Cabe mencionar que un RPAS, cuyas siglas significan Sistema de la Aeronave Pilotada Remotamente, hace mención a un completo sistema que es necesario y el cual permite la correcta y segura operación de un drone. Este RPAS está compuesto básicamente por lo siguiente:

- La aeronave.
- El operario.
- El mando de control.
- Equipo de comunicación.

### **2.1.1. Definición de drone**

La Real Academia de la Lengua Española define a la palabra dron (en inglés drone) como una aeronave no tripulada. A partir de esta referencia se puede establecer una definición más detallada, técnica y comprensible para cualquier persona, y es la siguiente:

Un drone es una aeronave o vehículo aéreo capaz de sustentarse en la atmósfera debido a las reacciones del aire con el mismo, obtenidas gracias a un sistema de propulsión propio, que no se encuentra tripulado y es controlado de forma remota.

**Figura 2**

*Drone operado a distancia*



*Nota:* En el gráfico se puede apreciar un drone y a su operador volándolo. Tomado de (Mediatrends, 2016).

**2.1.2. Usos de un drone**

Los RPA o drones al tener la ventaja de poder ser controlados desde largas distancias se convierten en aparatos tecnológicos muy útiles para diversas tareas que el operador u operadores deseen realizar en momentos determinados, casos de emergencia, entretenimiento o para acciones investigativas.

Las tareas o finalidades a las que sean asignados pueden ser en el ámbito civil o militar, por tanto sus usos son fundamentales en nuestra sociedad. Es por ello que a continuación se mencionaran algunos de los usos y aplicaciones que tienen los drones.

**a. Agricultura**

En varios países ya se están utilizando los drones dentro del área de la agricultura, pues constituyen una herramienta beneficiosa que proporciona una mayor eficiencia, control y mejor visibilidad de los extensos espacios de terreno que albergan

varios cultivos. La aplicación de drones dentro de la agricultura trae consigo ciertas ventajas, como es la recolección de datos por imágenes o sensores que pueden ser obtenidos en menor tiempo que con un grupo de personas.

Otra gran ventaja es el uso de drones para realizar actividades de fumigación, ya que tiene un mejor desempeño en comparación con la fumigación por aviones o por humanos, debido a que un drone vuela a menor altura dentro de un determinado espacio, se evita la afectación química de áreas externas y se emplea menos tiempo.

### **Figura 3**

*Drone para fumigación*



*Nota:* En la imagen se observa un drone fumigando un campo de agricultura.

Tomado de (Agrodrones, 2017).

#### **b. Fotografía y video**

Este es el principal uso que se le da a los drones actualmente, la obtención de fotografías y grabación de videos a gran altura ha ayudado a las distintas productoras de cine y a fotógrafos para innovar en su campo profesional.

Existen drones con muchas adaptaciones que benefician a esta aplicación como es el uso de estabilizadores de imagen, mejores sistemas de procesamiento e incorporación de cámaras profesionales, con lo que los resultados obtenidos son cada vez mejores.

#### **Figura 4**

*Drone para fotografía y video*

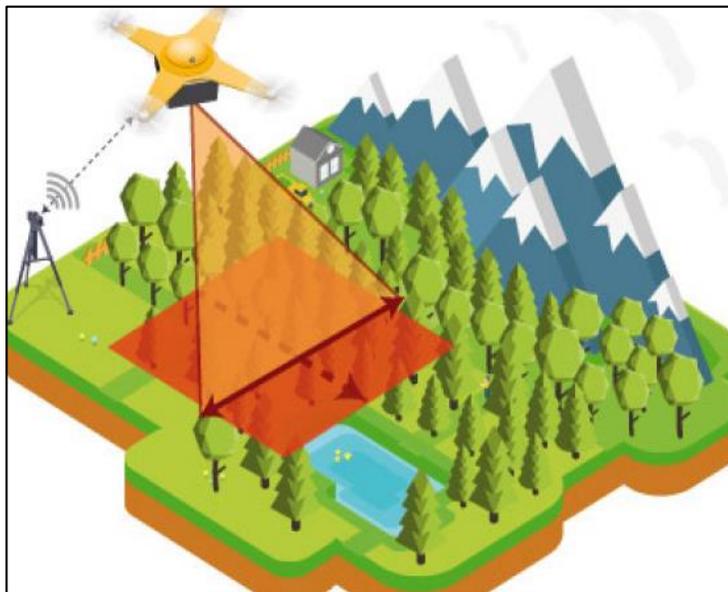


*Nota:* En el gráfico se observa un drone utilizado para grabar imágenes y video. Tomado de (Tecnidrones, 2019).

#### **c. Mapeo y topografía**

Es una nueva área de aplicación que constantemente va ganando importancia, debido a que el uso de los drones facilita la realización de tareas topográficas y el tiempo empleado para realizar el mapeo es cada vez menor.

En esta área el drone se encarga de sobrevolar un espacio delimitado de terreno, usualmente especificado por coordenadas GPS (Global Position System) que se implementan en el sistema de vuelo programado del aparato. Así se recolectan una serie de imágenes o también se graban videos para posteriormente ser procesadas en un software de computadora y generar un mapa tridimensional de la superficie terrestre.

**Figura 5***Drone topográfico*

*Nota:* En esta imagen se muestra un drone realizando un levantamiento topográfico de la superficie terrestre desde el aire. Tomado de (Villalta Ayala & Guerra Jara, 2016).

**d. Carreras**

En varias partes del mundo se está expandiendo la iniciativa de realizar competencias de velocidad con el uso de drones, en la cuales existen varios diseños de pistas en donde los drones y sus operarios requieren de un alto nivel de experiencia, agilidad y pericia para completar las distintas pruebas que se establecen a lo largo de las carreras.

Las competencias que usualmente existen se llevan a cabo en espacios abiertos como bosques y áreas cerradas como parqueaderos o coliseos. Una de las competencias con mayor realce y reconocimiento es la carrera de drones que se lleva a cabo en Las Vegas Estados Unidos.

**Figura 6**

*Drones de carrera*



*Nota:* En esta imagen se observa una carrera de drones. Tomado de (Fpvmania, 2017).

#### **e. Hobbie**

A las aeronaves pilotadas remotamente o igualmente conocidas como drones también se las puede encontrar en el área recreacional, en donde se los identifica fácilmente como juguetes, los que pueden llegar a ser tan pequeños que caben en la palma de la mano de una persona pero que son totalmente operacionales. Gracias a estos juguetes se puede tener una primera referencia de como es el funcionamiento esencial de los drones más avanzados.

**Figura 7**

*Drone recreativo*



*Nota:* En esta fotografía se observa un mini drone. Tomado de (Dronesconcamara, 2019).

## f. Envíos, repartos y mensajería

Han sido expuestas muchas ideas de implementación de drones para realizar tareas de mensajería pero lamentablemente muchas de estas no se han hecho realidad por medidas de seguridad.

La empresa que más apostado por esta aplicación y uso de drones es Amazon, una empresa que se dedica a la venta y envío de productos en varios países, cuyo proyecto llamado Amazon Prime Air consiste en un sistema de entrega de paquetería mediante el uso de drones. Este proyecto continuamente va creciendo a pasos agigantados, mejorando el sistema de envíos y creando un ambiente futurista en el área de mensajería.

### Figura 8

*Drone para mensajería*



*Nota:* Este es un drone de mensajería utilizado por la compañía Amazon. Tomado de (Villalta Ayala & Guerra Jara, 2016).

## g. Usos militares

Dentro de esta área se utiliza a los drones como vehículos no tripulados para combate aéreo en donde generalmente se llevan a cabo actividades en tiempo real controladas por los pilotos desde un centro de mando. Según las necesidades o la

misión que se desea cumplir estos drones pueden llevar armamento equipado y al carecer de un piloto a bordo la aeronave es más compacta, maniobrable y no tiene limitantes fisiológicas.

### **Figura 9**

#### *Drone militar*



*Nota:* La imagen muestra un drone de uso militar. Tomado de (Osorio, 2019).

### **2.1.3. Partes básicas de un drone**

Los drones en general deben poseer ciertas partes que resultan indispensables para su correcto funcionamiento, estas pueden ser de diferentes características y configuraciones, dependiendo del tipo y uso del drone, pero básicamente cumplen con un mismo accionar. Por tanto, las partes básicas que debe tener siempre un RPA son las siguientes:

#### **a. Motores y hélices**

Son los componentes primordiales para generar la fuerza de sustentación que le permite al drone elevarse del suelo y mantenerse en el aire. Dentro de este grupo también se encuentra el Controlador de Velocidad Electrónico (ESC), los cuales se encargan de regular y controlar la potencia de los motores, es decir, la velocidad de giro de las hélices. A mayor velocidad de giro de las hélices hay mayor fuerza de sustentación.

**Figura 10**

*Motor y hélice*



*Nota:* Aquí se observa un motor eléctrico y su hélice. Tomado de (Droning, 2014).

#### **b. Controlador de vuelo**

Es el dispositivo electrónico central del drone o comúnmente conocido como el cerebro de la aeronave. Este componente recibe, analiza y envía señales de datos a cada una de las demás partes del RPA o drone para su funcionamiento efectivo. En esencia todos los componentes montados sobre la estructura y el mando de control van conectados de una u otra manera al controlador de vuelo.

**Figura 11**

*Controlador de vuelo*



*Nota:* Este es un controlador de vuelo utilizado en drones. Tomado de (Droning, 2014).

### c. Mando a distancia

Similar a los mandos de las consolas de videojuegos que la mayoría de las personas conocen, este igualmente es un mando a distancia o control remoto portador de botones, switches y joysticks (palancas direccionales) que al ser accionados mecánicamente por el usuario envían señales electrónicas por el aire hasta llegar a un receptor instalado en el dron para que el mismo realice los movimientos de vuelo que se desee.

**Figura 12**

*Mando a distancia*



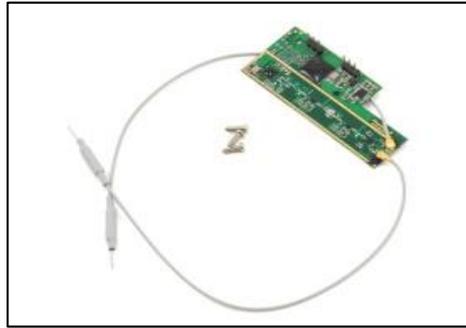
*Nota:* Aquí se observa un radiocontrol usado comúnmente para controlar vehículos a distancia. Tomado de (Droning, 2014).

### d. Radio receptor

Es el componente encargado de recibir las señales de radiofrecuencia o comandos generados por el mando a distancia y transmitirlos hacia el controlador de vuelo, para que la orden original del operador se convierta en un accionar del dron.

**Figura 13**

*Radio receptor*



*Nota:* Esto es una placa electrónica que recibe las señales del radiocontrol. Tomado de (Droning, 2014).

#### **e. Batería**

Es la fuente de energía eléctrica que alimenta a todos los componentes del dron para que así puedan encenderse y funcionar constantemente durante un tiempo determinado, el cual puede variar según la autonomía de la batería. Una batería se instala en la estructura del dron y otra se coloca en el mando a distancia, cada una puede poseer características diferentes.

**Figura 14**

*Batería*



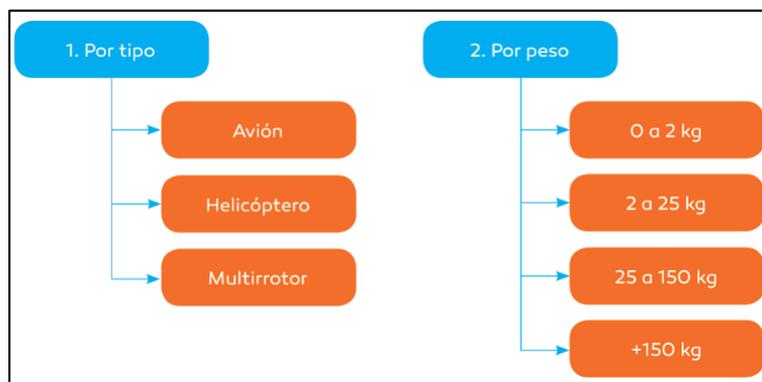
*Nota:* En la imagen se observa una batería para drones. Tomado de (Droning, 2014).

### 2.1.4. Clasificación de los drones

En el mundo existe una gran variedad de drones que se caracterizan y diferencian unos de otros, debido al diseño, tamaños, pesos y capacidades de vuelo. Por lo tanto, para poder clasificarlos se ha establecido dos grupos, ya que así se los divide en virtud de sus particularidades más comunes. Los cuales se detalla a continuación:

**Figura 15**

*Clasificación de los drones*



*Nota:* En el grafico se observa la clasificación para drones en base a dos características específicas. Tomado de (Vergara, y otros, 2016).

#### a. Clasificación por tipo

Esta clasificación se basa en el diseño de construcción de la estructura de los drones, las cuales son totalmente aerodinámicas que permiten a la aeronave poder sustentarse en el aire, y actualmente existen los siguientes tipos:

- **Tipo avión**

Basa su sustentación en el principio de ala fija. Puede poseer o no algún sistema de propulsión tales como hélices o turbinas.

Tiene como ventaja una mayor autonomía y la posibilidad de una mayor velocidad de desplazamiento comparada con los otros tipos, si su diseño así lo pretende (hay aviones contruidos para mantenerse en el aire volando a bajas velocidades mientras que otros diseños buscan ser eficaces volando rápido. Esto ira en función de la tarea para la que se vayan a emplear).

Como desventaja, cabe mencionar su incapacidad de vuelo estacionario. Es decir, no posee la capacidad de mantenerse detenido en el aire, teniendo limitado su desplazamiento en un solo sentido (hacia adelante).

### **Figura 16**

*RPA tipo avión*



*Nota:* Esto es un dron con un fuselaje basado en aviones. Tomado de (Aliexpress, 2019).

- **Tipo helicóptero**

Su principio de sustentación está basado en las alas giratorias. Consta de uno o dos rotores sustentadores, que pueden variar el paso (ángulo) de sus palas para maniobrar.

La ventaja de este tipo de RPA es su capacidad para mantenerse en vuelo estacionario y, además, poder deslizarse a lo largo de los tres ejes (teniendo así total libertad de movimiento).

Su desventaja es que ofrece menor autonomía que el tipo avión y una mayor complejidad mecánica (lo cual hace del mantenimiento algo más costoso y complicado).

### **Figura 17**

*RPA tipo helicóptero*



*Nota:* La estructura de este drone se basa en los helicópteros. Tomado de (Wikipedia, 2019).

- **Tipo multirotor**

Al igual que el helicóptero, el multirotor basa la sustentación en el principio de las alas giratorias. La diferencia viene dada en que este tipo de RPA emplea más de dos rotores para generar la sustentación necesaria para volar y las palas de los mismos son de paso fijo. Para maniobrar varía la velocidad de giro de los rotores.

Aporta una mayor estabilidad de vuelo y sus elementos mecánicos son más sencillos que los del tipo helicóptero (traduciéndose a un menor mantenimiento y con inferiores posibilidades de avería).

La desventaja es que posee una menor autonomía que la del tipo avión, al igual que como ocurre con el tipo helicóptero.

**Figura 18**

*RPA tipo multirotor*



*Nota:* En la imagen se observa un drone con 6 motores, también conocido como hexacóptero. Tomado de (Hélicéo, 2019).

#### **b. Clasificación por peso**

Otro tipo de clasificación que se le otorga de manera general a los distintos drones que existen en la actualidad es según el peso neto que estos tienen durante el despegue, y son los siguientes:

- **De 0 a 2 kg**

Son aeronaves de categoría de carga ligera con los componentes básicos para su funcionamiento. Permiten la operación de los mismos tanto dentro como fuera del campo visual del piloto, siempre dentro del alcance de la emisión de la radio y cumpliendo el resto de requisitos para este tipo de vuelos.

- **De 2 a 25 kg**

Contienen una mayor capacidad de carga útil. Solo se pueden utilizar dentro del alcance visual del piloto (limitado a 500 m de distancia).

- **De 25 a 150 kg**

Son equipos de uso profesional con mayor carga útil. Requieren de una licencia para ser pilotados y solo podrán operar en las condiciones y limitaciones detalladas en su certificado de aeronavegabilidad.

- **Más de 150 kg**

Son la categoría más pesada y su utilización será regulada por la normativa de aviación. Estos equipos son exclusivamente destinados como equipo de salvamento, rescate y búsquedas para fuerzas de apoyo.

### **2.1.5. Características técnicas de un drone**

Al igual que la diversidad de tipos de drones que existen en el mundo, también hay una gran variedad de detalles técnicos y especificaciones que diferencian a cada uno de estos dispositivos tecnológicos.

Dependiendo de la utilidad que se le vaya a otorgar al drone, las características del mismo son indispensables para que el aparato cumpla a cabalidad con las tareas que el operario desee realizar.

De manera general, las características técnicas más importantes que se debe tener en cuenta en todas las gamas de drones de uso civil, son las siguientes:

#### **a. Peso**

Un drone utilizado exclusivamente para fines de entretenimiento o como muchas personas lo llaman, un drone de juguete, tiene un peso menor a un kilogramo (1 kg), y comúnmente se puede encontrar drones cuyo peso está entre los 50 gr y los 500 gr.

“Cuando se pasa del kilogramo, ya se puede hablar de un drone ‘de verdad’, utilizado por empresas para trabajos varios, y de estos podemos encontrar de hasta 25 kg o más, en función del tipo de trabajo que se quiera realizar” (García Mateu, 2016, pág. 3).

**Figura 19**

*Drone de juguete*



*Nota:* En la fotografía se muestra un drone utilizado para entretenimiento. Tomado de (Banggood, 2019).

## **b. Velocidad**

La velocidad se mide en razón de la cantidad de distancia que el drone puede recorrer en un determinado lapso de tiempo y esta varía dependiendo del tamaño y especificaciones técnicas que posea dicho drone.

De manera general, la velocidad que comúnmente alcanzan los drones más pequeños es de 2 m/s. Los drones de mayor tamaño, o también conocidos como drones de gama media y drones de gama alta, normalmente alcanzan y superan la velocidad de 27.28 m/s (100 km/h).

**Figura 20**

*Drone de gama media*



*Nota:* Este tipo de drone forma parte de los gama media, debido a sus características innovadoras, y es usado por la mayoría de personas. Tomado de (Dronesbaratosya, 2019).

**c. Altura de vuelo**

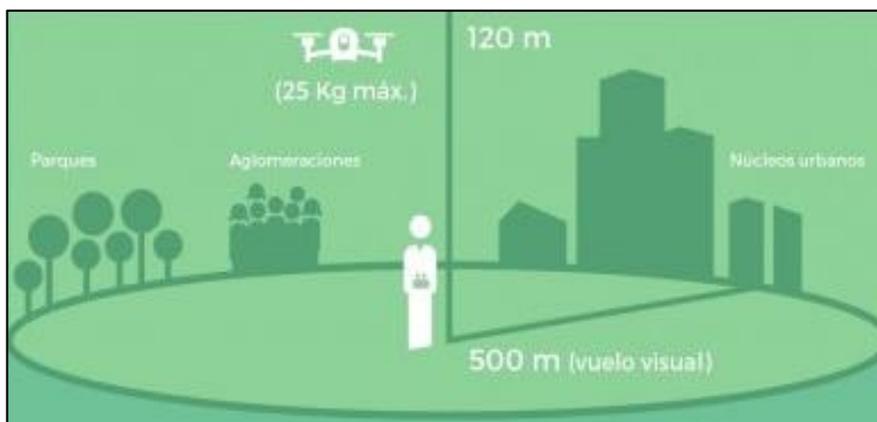
La altura es la distancia vertical comprendida entre un punto de la superficie terrestre y el nivel de vuelo del drone.

Esta distancia que puede alcanzar un drone es directamente proporcional con la intensidad de la señal del radiocontrol, es por ello que usualmente los drones de gama baja no pueden llegar a grandes alturas.

Pero aquellos drones de gama media o gama alta, fácilmente pueden volar a una altura de 120 m, ya que sus controles de vuelo son más avanzados, dando como resultado una mayor intensidad (mayor rango) de la señal.

## Figura 21

*Altura de vuelo de un drone*



*Nota:* En el gráfico se muestra las distancias entre el drone y el usuario.

Tomado de (Domínguez, 2018).

### d. Rango de operación

El rango de operación es la distancia comprendida entre el drone y el radiocontrol, en cualquier dirección. Es decir, “lo máximo que se puede alejar el drone del sitio desde el que recibe la señal” (García Mateu, 2016, pág. 4).

En aquellos drones que se utilizan solo para fines de entretenimiento (drones de juguete) la señal de su radiocontrol comienza a decaer entre los 15 m y 30 m de distancia. Y cuando sobrepasan dicho rango de operación, el drone pierde totalmente la señal de control, dando como resultado en la mayoría de casos una precipitación a tierra, ya sea porque el drone se alejó hasta agotar su batería, se impactó contra un árbol o edificación, o simplemente su controlador de vuelo al no recibir más datos empieza a reducir la potencia de sus motores hasta apagarlos totalmente.

La única limitación de aquellos drones de gamas superiores que no poseen un FPV (First Person View) es el campo visual de la persona que lo está controlando. En

cambio, los RPA o drones que si poseen un FPV en su sistema de control pueden alcanzar a tener un rango de operación igual o mayor a 500 metros de distancia, esto depende de la potencia de transmisión de la señal.

El FPV (First Person View) es un sistema con una cámara a bordo del drone y una pantalla receptora portátil a disposición del operador. Con esto el drone mientras se encuentra en vuelo transmite la señal de video en vivo hacia la pantalla, de forma que el operador puede observar las imágenes de la ruta que sigue el drone y controlarlo, sin la necesidad de tener contacto visual directo (línea de vista) con el aparato.

### Figura 22

#### *Rango de operación*



*Nota:* Ejemplo del rango de operación de 2 Km y 300 m del emisor y receptor. Tomado de (Jbebopforum, 2015).

#### **e. Autonomía**

La autonomía es la capacidad máxima del dron para funcionar, sin la necesidad de recargar su fuente de energía. En otros términos, es el tiempo de duración de la batería mientras el dron se encuentra operando. Los drones de gama baja tienen una autonomía promedio de 15 minutos en vuelo, mientras que los drones de gama alta poseen una autonomía de vuelo de 90 minutos. “Cuanto más peso sean capaces de levantar los motores, más pesadas son las baterías que se pueden añadir y por tanto mayor es la autonomía de vuelo” (García Mateu, 2016, pág. 4).

**Figura 23***RPA con autonomía de 20min*

*Nota:* Este es un ejemplo de un dron que puede permanecer operando hasta por 20 minutos. Tomado de (Dhgate, 2019).

#### **2.1.6. Normativa de operación de drones en el Ecuador**

La Dirección General de Aviación Civil del Ecuador (DGAC), al ser la institución encargada de planificar, regular, controlar y administrar la actividad aeronáutica y aeroportuaria, para garantizar la seguridad en las operaciones aéreas del país, frecuentemente emite conjuntos de documentación técnico legal, cuyas normas y especificaciones son de carácter mandatorio, es decir, que los usuarios deben cumplir inmediata y obligatoriamente.

Tal es el caso de la Resolución No 251/2015 que la Dirección General de Aviación Civil del Ecuador (DGAC) emitió el 17 de septiembre del año 2015, mediante su máximo representante, en la cual se resuelve “aprobar el establecimiento de disposiciones complementarias que normen la Operación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) o conocidas como DRONES o Sistemas de Aeronaves No Tripulados (UAS)” (Resolución No 251/2015, 2015, pág. 1).

Una de las consideraciones por la que se dictaminó esta resolución, es debido a que la Dirección General de Aviación Civil del Ecuador (DGAC) no dispone de una reglamentación en la cual se establezca los requisitos para la operación de drones o RPAS, además de la finalidad de precautelar la seguridad operacional en todas las actividades aéreas que se desarrollen dentro del territorio nacional.

## Figura 24

### Resolución No 251/2015



**DIRECCIÓN GENERAL DE AVIACIÓN CIVIL**

**RESOLUCIÓN No 251 / 2015**

**El Director General de Aviación Civil**

**Considerando:**

**Que**, la Dirección General de Aviación Civil no dispone de una reglamentación que establezca requisitos para la Operación de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) o conocidas como DRONES o Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS);

**Que**, con la finalidad de precautelar la seguridad operacional en las actividades aéreas, usuarios del transporte aéreo y público en general, debido al incremento significativo de operaciones con Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) o conocidas como DRONES o Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS), es necesario establecer disposiciones generales para la operación de las Aeronaves antes citadas;

**Que**, de acuerdo con el Art. 6, numeral 3, literal a) de la Ley de Aviación Civil, publicada en el Registro Oficial No. S-435 del 11 de enero del 2007, se determina las atribuciones y obligaciones del Director General de Aviación Civil: "Dictar, reformar, derogar regulaciones técnicas, órdenes, reglamentos internos y disposiciones complementarias de la Aviación Civil, de conformidad con la presente Ley, el Código Aeronáutico, el Convenio sobre Aviación Civil Internacional y las que sean necesarias para la seguridad de vuelo, y la protección de la seguridad del transporte aéreo"; y,

En uso de las atribuciones legales,

**RESUELVE:**

**Artículo Primero.-** Aprobar el establecimiento de disposiciones complementarias que normen la Operación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) o conocidas como DRONES o Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS), las mismas que se detalla a continuación:

**Art. 1 Operaciones en las cercanías de un aeródromo**

Se prohíbe la operación de las RPAS/UAS en espacios aéreos controlados.

La operación de las RPAS/UAS se mantendrá durante toda la duración del vuelo, a una distancia igual o mayor a 9 kilómetros (5 NM) de las proximidades de cualquier aeródromo o base aérea militar.

*Nota:* Este es el documento expedido y aprobado por la autoridad aeronáutica con respecto a la utilización de aeronaves pilotadas a distancia. Tomado de (DGAC, 2015).

En esta resolución se establece normas respecto a los lugares prohibidos para la operación de RPAS, la altura máxima de vuelo, las horas que pueden entrar en operación, la responsabilidad de quienes operen estas aeronaves, las limitaciones de uso, los seguros de los drones, entre otros, todo esto redactado en 10 únicos artículos, los que se mencionan textualmente a continuación:

**Art. 1 Operaciones en las cercanías de un aeródromo.-** Se prohíbe la operación de las RPAS<sup>1</sup>/UAS<sup>2</sup> en espacios aéreos controlados.

La operación de las RPAS/UAS se mantendrá durante toda la duración del vuelo, a una distancia igual o mayor a 9 kilómetros (5NM<sup>3</sup>) de las proximidades de cualquier aeródromo o base aérea militar.

**Art. 2 Altura máxima de vuelo.-** La operación de las RPAS/UAS no excederá en ningún momento una altura de vuelo de 400 pies (122 metros) sobre el terreno (AGL<sup>4</sup>).

**Art. 3 Horas de operación.-** Las RPAS/UAS serán operadas solamente en las horas comprendidas entre la salida y la puesta del sol; y en condiciones meteorológicas de vuelo visual (VMC), libre de nubes, neblina, precipitación o cualquier otra condición que obstruya o pueda obstruir el contacto visual permanente con la RPAS/UAS.

**Art. 4 Responsabilidad por la operación.-** La persona que opera los controles de las RPAS/UAS será responsable por la operación general de la misma durante todo el vuelo, en forma solidaria con el explotador o propietario de la aeronave.

---

<sup>1</sup> RPAS: Sistema de la Aeronave Pilotada Remotamente

<sup>2</sup> UAS: Unmanned Aerial System

<sup>3</sup> NM: Milla Náutica

<sup>4</sup> AGL: Sobre el nivel del suelo

**Art. 5 Integridad fisiológica del operador de una RPA.-** Ninguna persona operara los controles de una RPAS/UAS sí:

- a) Se encuentra fatigado, o si considera que pudiera sufrir los efectos de la fatiga durante la operación;
- b) Se encuentra bajo el efecto del consumo de bebidas alcohólicas, o de cualquier droga que pudiera afectar sus facultades para operar los controles de manera segura.

**Art. 6 Funciones de automatización.-** Si las RPAS/UAS tienen la capacidad de realizar vuelo automático, esta función podrá ser utilizada solamente si le permite al operador de los controles intervenir en cualquier momento para tomar el control inmediato de la aeronave.

**Art. 7 Limitaciones.-** La persona que opera los controles de una RPAS/UAS es responsable por asegurarse que la misma sea operada de acuerdo con las limitaciones operacionales establecidas por el fabricante.

**Art. 8 Seguros.-** El propietario o explotador de las RPAS/UAS están en la obligación de responder por los daños causados a terceros, como resultado de sus actividades de vuelo, para lo cual debe contratar la póliza de seguros de responsabilidad civil legal a terceros en los montos mínimos establecidos en la tabla que consta a continuación:

**Art. 9 Cumplimiento con las leyes y reglamentos locales.-** El cumplimiento de estas disposiciones, no exime al operador de las RPAS/UAS de cumplir con las leyes y reglamentos locales aplicables.

**Art. 10 Consideración final.-** Cualquier aspecto no considerado en la presente resolución, será analizado y resuelto por la Autoridad Aeronáutica Civil.

## 2.2. Drone cuadricóptero T4

Dentro de la clasificación de los drones tipo multirrotor se encuentra el cuadricóptero T4, el cual es una aeronave cuya estructura está compuesta por cuatro brazos y que al final de cada uno de ellos va instalado un motor con una hélice para generar la fuerza de sustentación y empuje, que le permite elevarse y maniobrar en el aire.

**Figura 25**

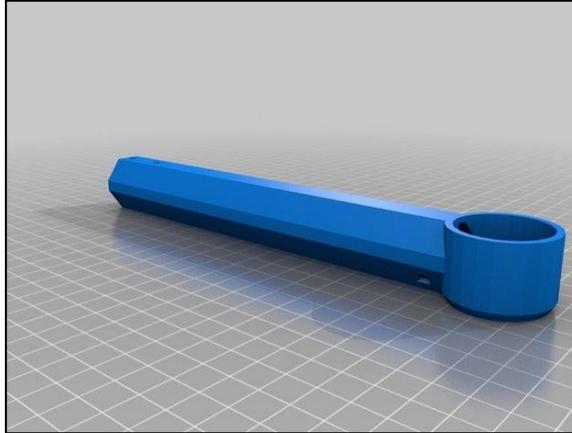
*Cuadricóptero T4*



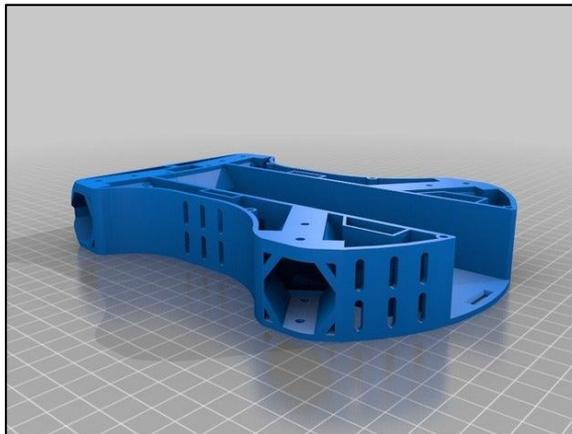
*Nota:* En la imagen se observa un drone cuadricóptero T4. Tomado de (Brendan22, 2014).

### 2.2.1. Diseño estructural

El nombre 'cuadricóptero T4' es asignado específicamente para el drone que se muestra en la Figura 25, debido al diseño estructural único que este tiene y el cual solamente puede variar en tamaño. La denominación "T4" quiere decir que la estructura del drone está compuesta por 4 brazos tubulares que conectan a los motores con la pieza central.

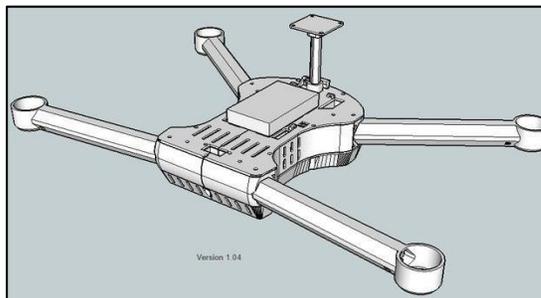
**Figura 26***Brazo tubular*

*Nota:* En la imagen se muestra un brazo tubular del cuadricóptero T4. Tomado de (Brendan22, 2014).

**Figura 27***Pieza central*

*Nota:* En la imagen se muestra el cuerpo principal del cuadricóptero T4. Tomado de (Brendan22, 2014).

Este diseño se basa en brazos tubulares, como ya se mencionó anteriormente, con una viga vertical en forma de “I” que baja por el centro. Todas las piezas en conjunto forman una estructura muy fuerte, rígida y muy estable durante el vuelo.

**Figura 28***Estructura del cuadricóptero T4*

*Nota:* Este es el diseño estructural del drone cuadricóptero T4.

Tomado de (Brendan22, 2014).

La estructura del cuadricóptero T4 alberga eficazmente cada uno de los componentes necesarios para su funcionamiento, los cuales si pueden variar en base a la características técnicas que el operario considere mejor, además, este diseño estructural del cuadricóptero T4 tiene como gran ventaja que para ser construido se lo puede realizar a partir de una impresión 3D. Otras características de este diseño estructural son:

- El cableado de los motores se enruta a través de los brazos y hacia el interior de una bandeja cerrada y ventilada para la alimentación y el ESC (Electronic Speed Controller).
- La batería está ubicada en el centro de rotación.
- Los túneles biselados para cables proporcionan una forma de enrutar el cableado entre la bandeja de alimentación y la placa superior.
- La placa superior está diseñada para los controladores de vuelo Pixhawk con el GPS elevado.
- La bandeja inferior tiene puntos de montaje para un Gimbal Tarot (soporte para cámara GoPro).

Otros nombres que se les atribuye a los cuadricópteros a menudo son quadcopter o quadrotor, los cuales tienen el mismo significado porque están compuestos de cuatro motores, pero también existen otras variantes como los tricópteros (tres motores), hexacópteros (seis motores), y octacópteros (ocho motores).

Una de las diferencias entre cada uno de esos tipos de drones es el diseño estructural que se le otorgue, el cual se lo puede mencionar en el nombre del drone para así poder identificar fácilmente la forma de construcción de su estructura.

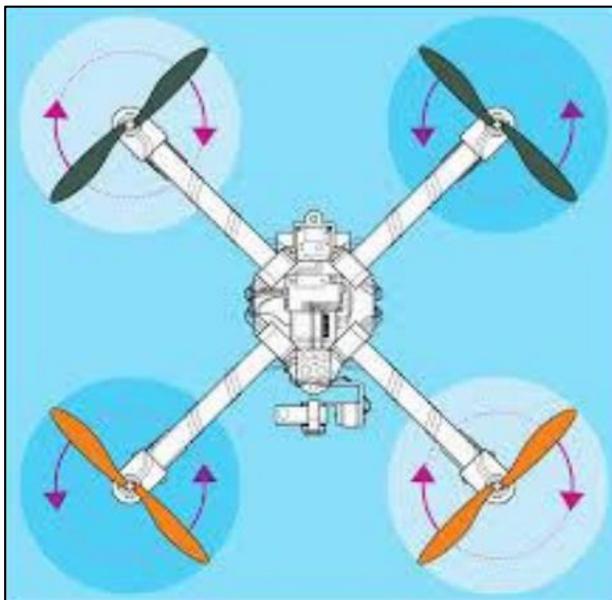
### **2.2.2. Sistema de propulsión**

El sistema de propulsión es el conjunto de componentes (motores, hélices, controlador de velocidad electrónico, batería y módulo de energía) encargados de generar la fuerza de sustentación necesaria para elevar al drone de la superficie terrestre, y también generar el empuje suficiente para realizar todos los movimientos de vuelo y las maniobras que el operador de la aeronave desee.

“La característica principal del Quadcopter son la disposición simétrica y su rotación asimétrica dos a dos. Esto le permite equilibrarse aplicando rotaciones iguales en los 4 motores, y al mismo tiempo hace calcular los giros” (Moyano Díaz, 2014).

Es decir, la disposición simétrica se refiere a que la distancia comprendida entre 2 motores es igual a la distancia entre los otros 2 motores restantes, y la rotación asimétrica significa que la hélices de 2 motores opuestos entre si giran en sentido horario y las hélices de los otros 2 motores opuestos restantes giran en sentido antihorario.

Para mejor comprensión respecto a la rotación asimétrica, la Figura 29 muestra de manera ilustrativa el sentido de giro de cada una de las hélices del drone.

**Figura 29***Rotación de hélices*

*Nota:* Aquí se observa el sentido de giro de las hélices de un dron compuesto por 4 motores. Tomado de (García Mateu, 2016).

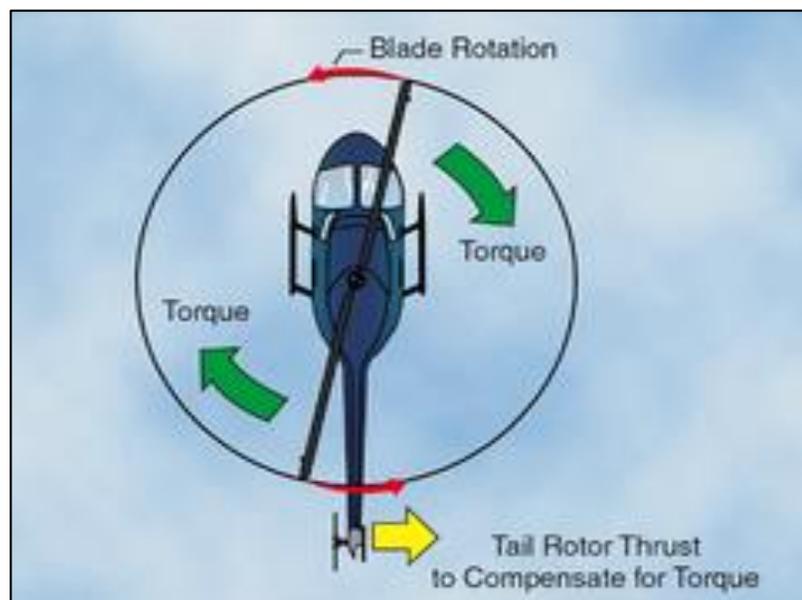
Este peculiar pero indispensable movimiento de las hélices es necesario para poder equilibrar las fuerzas de acción y reacción (Ley de Newton) que se generan debido al giro de las mismas hélices.

Ya que, si las 4 hélices giraran en un mismo sentido, la fuerza de reacción hará que la estructura del dron gire en sentido contrario, ocasionando un movimiento giratorio descontrolado y precipitando la aeronave al suelo.

Este principio de funcionamiento es igual al de los rotores de un helicóptero, donde para equilibrar el momento (par de fuerza o torque) generado por el rotor principal, se dispone de un rotor secundario (rotor de cola) que proporciona un empuje contrario al torque del rotor principal, y así todas las fuerzas se compensan.

**Figura 30**

*Torque de un helicóptero*

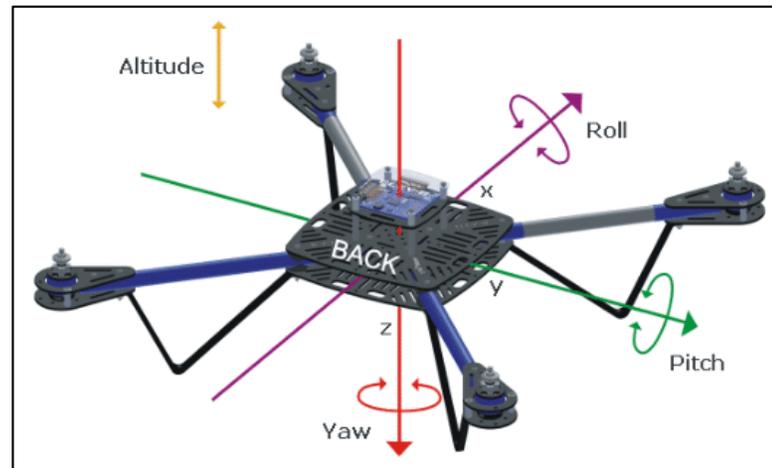


*Nota:* En el gráfico se observa el torque de un helicóptero. Tomado de (Wikipedia, 2019).

Con el movimiento de las hélices mencionado anteriormente se obtiene la fuerza de sustentación necesaria para elevar el drone y mantenerlo en vuelo recto y nivelado, siempre y cuando los 4 motores tengan la misma potencia o empuje, cuya fuerza total debe ser superior al peso del cuadricóptero.

Al igual que en otros tipos de aeronaves, el sistema de propulsión del drone cuadricóptero T4, además del control de altura de vuelo, le permite realizar las tres clases de rotaciones existentes en sus ejes vertical, longitudinal y transversal, los cuales son:

- El yaw (guiñada)
- El roll (balanceo)
- El pitch (cabeceo)

**Figura 31***Ejes de movimiento*

*Nota:* Estos son los 3 ejes con sus respectivos movimientos. Tomado de (Etigowni, 2018).

Por tanto, las configuraciones que pueden tener los motores del dron cuadricóptero T4 para generar los movimientos asociados a sus ejes son las siguientes:

#### **a. Control de Altura**

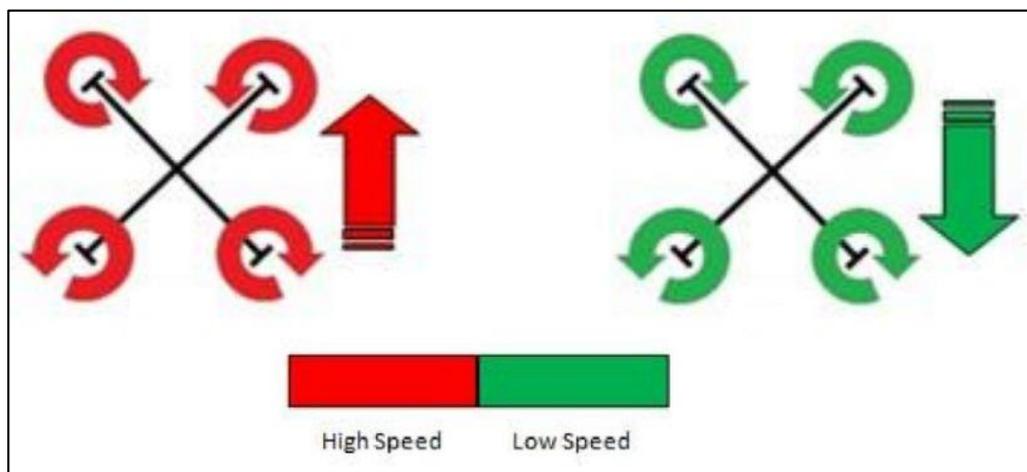
Correspondiente al eje vertical del cuadricóptero, el control de la altura se lo obtiene aplicando la misma velocidad a los 4 motores. Esta cantidad total de empuje (sumatoria de fuerzas de todos los motores) nos permite tener tres movimientos, los cuales son: Estabilización en el aire, aumentar la altura de vuelo y disminuir la altura de vuelo.

- Para 'estabilizarse' en el aire la fuerza de sustentación debe ser igual que la fuerza peso (generada por la atracción gravitatoria) del cuadricóptero.
- Para 'ascender' la fuerza de sustentación debe ser mayor que la fuerza peso del cuadricóptero, esto aumentando la potencia de los 4 motores.

- Para 'descender' la fuerza de sustentación debe ser menor que la fuerza peso del cuadricóptero, esto disminuyendo la potencia de los 4 motores.

**Figura 32**

*Control de altura*



*Nota:* En esta ilustración se muestra la diferencia de velocidad de giro de los motores para el control de la altura de vuelo de un cuadricóptero. Tomado de (García Mateu, 2016).

Lo mencionado anteriormente es lo que corresponde a la teoría pero durante la práctica, es decir en la vida real, no siempre se cumplen estos principios a cabalidad, es así que el estudio de Betancourt Vera de 2016 menciona lo siguiente:

Siempre existen ciertas variaciones en las fuerzas generadas por los motores, ya sea porque las constantes de los motores son diferentes o las velocidades angulares giran a distintas revoluciones. Estas diferencias causan que el vehículo tenga ciertas rotaciones en su centro de gravedad y llevan a la fuerza de sustentación total tenga una diferencia angular con el eje z. Esta diferencia da lugar a un desplazamiento en el plano xy. (pág. 16)

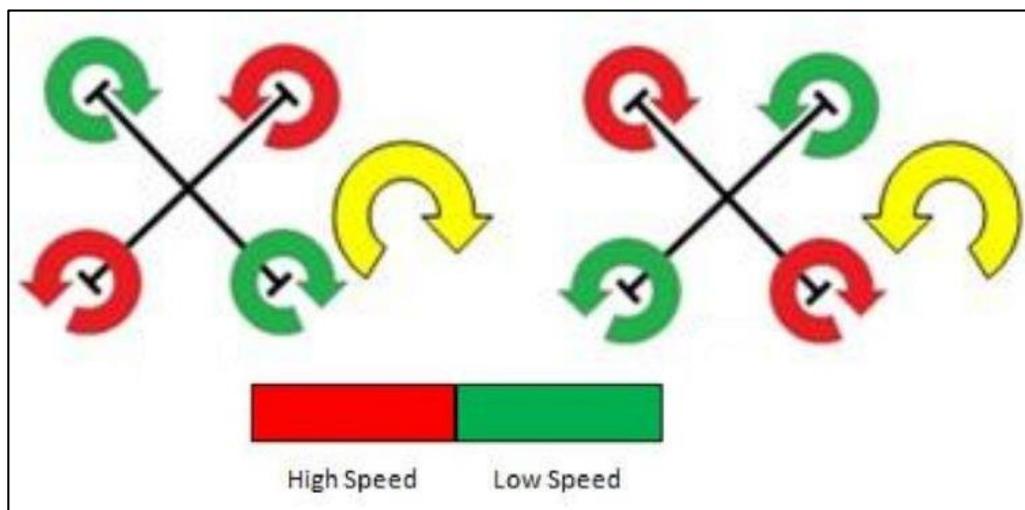
## b. Control del Yaw

Correspondiente al eje vertical del cuadricóptero, el control del Yaw (guiñada) se lo obtiene aumentando la velocidad de 2 motores opuestos (frontal derecho y posterior izquierdo, o viceversa) y disminuyendo la velocidad de los otros 2 motores opuestos.

- Para girar en sentido 'horario' la velocidad de los motores frontal derecho y posterior izquierdo es alta, y la velocidad de los motores frontal izquierdo y posterior derecho es baja.
- Para girar en sentido 'antihorario' la velocidad de los motores frontal derecho y posterior izquierdo es baja, y la velocidad de los motores frontal izquierdo y posterior derecho es alta.

**Figura 33**

*Control del yaw*



*Nota:* En esta ilustración se muestra la diferencia de velocidad de giro de los motores para el control de la guiñada de vuelo de un cuadricóptero. Tomado de (García Mateu, 2016).

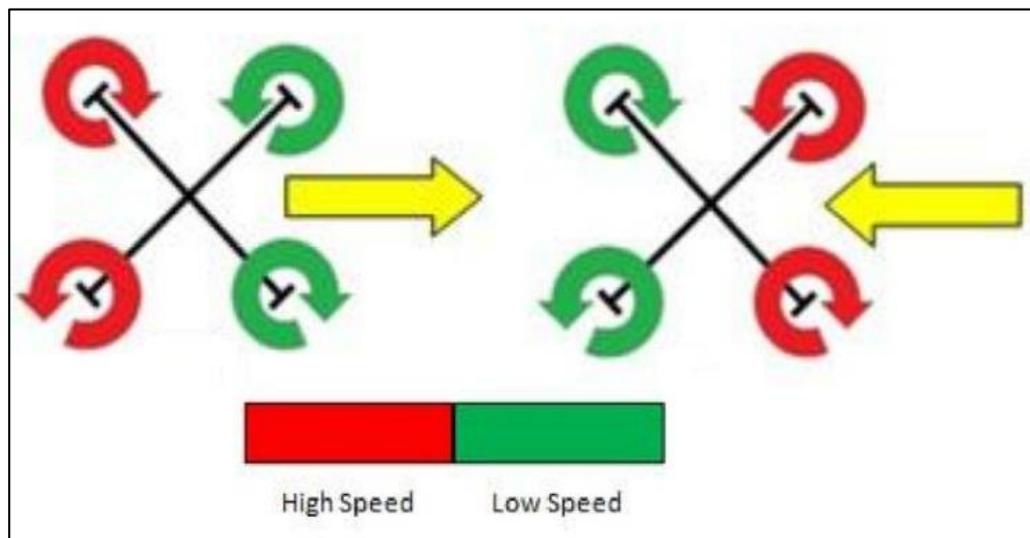
### c. Control del Roll

Correspondiente al eje longitudinal del cuadricóptero, el control del Roll (balanceo) se lo consigue aumentando la velocidad de los 2 motores de un mismo lado (izquierdo o derecho) y disminuyendo la velocidad de los 2 motores del otro lado.

- Para balancearse a la 'derecha' la velocidad de los motores izquierdos es alta y la velocidad de los motores derechos es baja.
- Para balancearse a la 'izquierda' la velocidad de los motores izquierdos es baja y la velocidad de los motores derechos es alta.

**Figura 34**

*Control del roll*



*Nota:* En esta ilustración se muestra la diferencia de velocidad de giro de los motores para el control del balanceo de vuelo de un cuadricóptero. Tomado de (García Mateu, 2016)

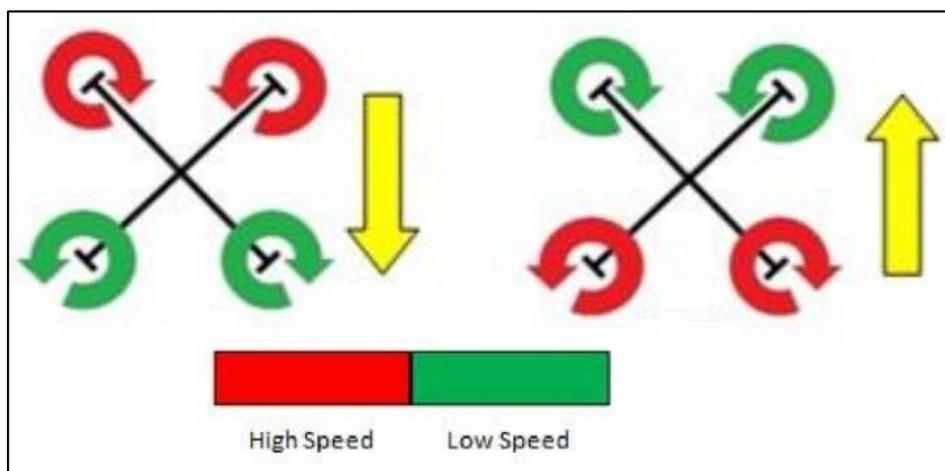
#### d. Control del Pitch

Correspondiente al eje transversal del cuadricóptero, el control del Pitch (cabeceo) se lo consigue aumentando la velocidad de los 2 motores de un mismo lado (frontales o posteriores) y disminuyendo la velocidad de los 2 motores del otro lado.

- Para cabecear hacia 'atrás' la velocidad de los motores frontales es alta y la velocidad de los motores posteriores es baja.
- Para cabecear hacia 'adelante' la velocidad de los motores frontales es baja y la velocidad de los motores posteriores es alta.

**Figura 35**

*Control del pitch*



*Nota:* En esta ilustración se muestra la diferencia de velocidad de giro de los motores para el control del cabeceo de vuelo de un cuadricóptero. Tomado de (García Mateu, 2016).

Una vez que se alcanza la altura, giro, balanceo o cabeceo deseado, los cuatro motores del cuadricóptero se estabilizan a la misma velocidad de forma automática, esto gracias al controlador de vuelo.

### 2.2.3. Sistema de control

La comunicación que hay establecida entre la unidad de control en tierra y el dron se lleva a cabo a través de emisiones de ondas de radio.

- **Señales electromagnéticas:** Estas ondas de radio son emisiones electromagnéticas, que consisten en ondas producidas por movimiento ondulatorios asociados a un campo eléctrico y a otro magnético perpendiculares entre sí (ondas transversales).
- **Rango de radiofrecuencias:** Las ondas electromagnéticas se clasifican por su frecuencia. Se denomina frecuencia de oscilación al número de ondas completas (ciclos) que se repiten por segundo. Su unidad de medida es el hercio (Hz) y una onda completa por segundo equivale a 1 Hz.
- **Alcance de emisión:** El alcance de una señal electromagnética viene dado por la potencia de emisión (intensidad del campo eléctrico que la origina). Con una potencia de emisión grande, se conseguirá generar una señal más intensa capaz de llegar más lejos. Esto demandará un mayor consumo eléctrico por parte del equipo emisor.

#### a. Emisor-receptor de señal

Es el elemento encargado, mediante señales de radio a través de una antena, de enviar al dron la información necesaria para el control del vuelo y la operación del resto de equipos que lleva instalados, así como recibir los datos procedentes de los sensores embarcados.

#### b. Mando de vuelo

El mando de vuelo posee un par de palancas y elementos de control que nos permiten pilotar el aparato de forma manual o semi-manual, dándonos mando sobre los motores y demás sistemas que influyen directamente en el vuelo.

### 2.3. Grupo motopropulsor

“El grupo motopropulsor es el conjunto de motores, hélices o rotores encargados de proporcionar tracción o empuje al RPA para que pueda desplazarse en el aire por sus propios medios” (Vergara, y otros, 2016, pág. 17). A continuación se mencionará los medios de propulsión más comunes que se pueden utilizar en los RPA o drones, dentro de los cuales se especifican las características de cada uno de ellos.

**Figura 36**

*Grupo motopropulsor de un drone*



*Nota:* Estos son los componentes del grupo motopropulsor de un drone. Tomado de (Mercadolibre, 2019).

#### 2.3.1. Motores

Los motores constituyen los elementos principales que otorgan movimiento al drone o RPA (Aeronave Pilotada de forma Remota). Dicho movimiento pueden generarlo por sí mismos (turbinas) o a través de rotores o hélices, que cumplirán la función de producir el desplazamiento del drone transformando la energía giratoria del motor en tracción o empuje. De manera general se puede encontrar tres grandes grupos de tipos de motores que se utilizan en drones de uso civil y militar, los cuales son:

- Motores de explosión
- Motores a reacción
- Motores eléctricos

Estos tipos de motores poseen sus respectivas configuraciones, ventajas y desventajas, que son primordiales al momento de elegir el tipo de propulsión que se desea instalar en un dron, para que cumpla con el tipo de operación que se necesita. Las características que son necesarias al momento de elegir el motor más adecuado para un dron son: la potencia, autonomía, rendimiento, peso y el tipo de mantenimiento.

Los drones que mayormente utiliza la población civil para sus diferentes finalidades, son aquellos que emplean motores eléctricos, debido a ciertos aspectos como su gran eficiencia, tamaño reducido, mantenimiento sencillo, fácil control operacional, etc. Es por esta razón que a continuación únicamente se tratará más a fondo acerca de los motores eléctricos.

#### **a. Motores eléctricos**

“El motor eléctrico es el motor más extendido dentro del mundo de los drones multirrotores por su fiabilidad, simplicidad mecánica y suavidad de funcionamiento” (Vergara, y otros, 2016, pág. 21). El principio de funcionamiento de este tipo de motor es la transformación de energía eléctrica en energía mecánica, gracias a la rotación de un campo magnético alrededor de un bobinado por el cual circula la corriente eléctrica.

Dentro de los motores eléctricos de uso para drones existen 2 tipos, los que se diferencian debido al uso de la corriente continua (motores Brushed) o corriente alterna (motores Brushless), pero la potencia es la variable común entre ellos, la cual es medida en vatios o watts (W).

El método que se utiliza para conocer la potencia que tiene un motor es multiplicando los amperios de consumo a máximo desarrollo del motor (especificado por el fabricante) por los voltios que tenga la batería empleada. Por ejemplo:

- Amperaje de consumo del motor = 15 A.
- Voltaje de la batería = 11,1 V.

$$I \times V = P$$

$$15 \text{ A} \times 11,1 \text{ V} = 166,5 \text{ W.}$$

- **Motores Brushed**

Son aquellos motores que operan con corriente continua (CC o DC). La velocidad de giro que proporciona este tipo de motor se la controla por medio de un reostato, que es una resistencia variable, y el sentido de giro del motor se lo puede invertir al cambiar la polaridad del mismo.

**Figura 37**

*Motores eléctricos Brushed*



*Nota:* En la imagen se observa como son los motores eléctricos brushed. Tomado de (Vergara, y otros, 2016).

Los motores Brushed utilizan escobillas para cerrar eléctricamente el circuito comprendido entre el estator (parte no giratoria del motor) y el rotor (parte giratoria del motor), esto es en función del ángulo de giro del rotor.

Estas escobillas son un elemento conductor que transmite la energía eléctrica al bobinado del núcleo (rotor) para así crear un campo magnético que lo atrae o repele, en función de la posición en la que se encuentre el rotor con respecto a los imanes ubicados en ambos extremos del estator, con polarizaciones opuestas.

Las desventajas de estos motores que emplean corriente continua es que tienen un peso hasta 3 veces mayor al de un motor Brushless, las escobillas se van desgastando con cada giro, existen chispas, corrientes parásitas y generan más calor.

### **Figura 38**

*Interior de un motor Brushed*



*Nota:* Esta es la parte interna de un motor con escobillas. Tomado de (Vergara, y otros, 2016).

- **Motores Brushless**

Son aquellos motores que operan con corriente alterna (AC), son trifásicos y no poseen escobillas. Esta clase de motores se alimentan de corriente eléctrica mediante cables (uno por cada fase), los cuales van conectados a tres terminales del bobinado que están fijos en el estator. Y un controlador de velocidad electrónico (ESC) es el encargado de regular su correcto funcionamiento.

**Figura 39**

*Motores eléctricos Brushless*



*Nota:* En la imagen se observa como son los motores eléctricos brushless.

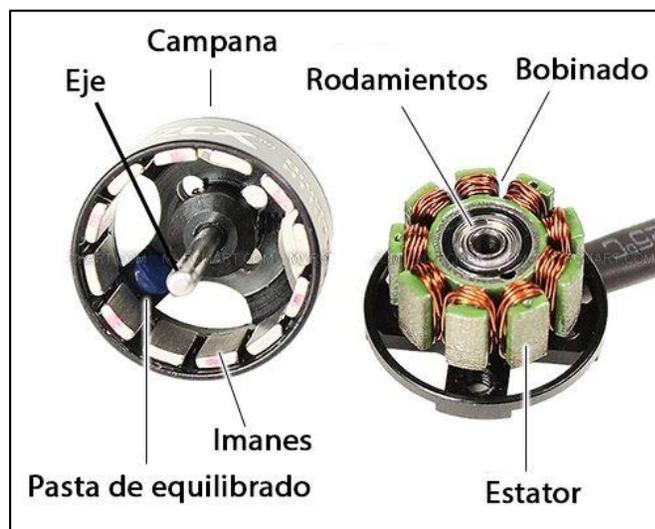
Tomado de (Prometec, 2019).

Los motores Brushless poseen muchas ventajas respecto a los motores Brushed, entre las cuales se destaca su mejor eficiencia, ya que la potencia es muy superior a la de un motor con escobillas (Brushed) del mismo tamaño o peso, resultando también en una mayor duración de las baterías para una misma potencia.

Otras de las ventajas, es que un motor sin escobillas (Brushless) nos ofrece un mayor rango de velocidades de giro, no se producen fricciones ni chispas en su interior, son más silenciosos, su mantenimiento es más sencillo y por lo tanto aumenta considerablemente su tiempo de vida.

**Figura 40**

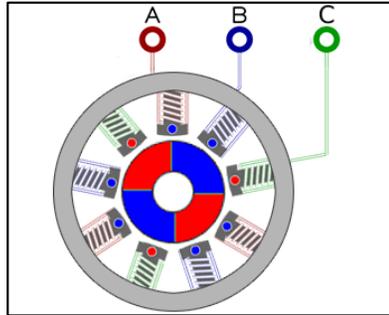
*Interior de un motor Brushless*



*Nota:* Esta es la parte interna de un motor sin escobillas. Tomado de (Tutorialdedrones, 2019).

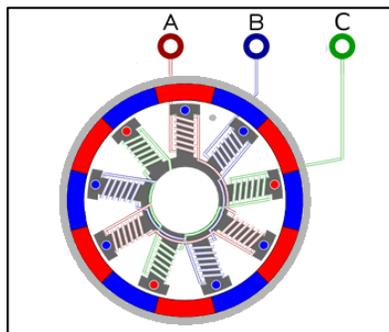
Existen 2 tipos de motores eléctricos Brushless, y son los siguientes:

- **Inrunner:** “Conservan una disposición convencional, en que el rotor (imanes) gira en el interior del estator (bobinado), haciendo que se vea girar únicamente el eje como en el caso de los motores tradicionales de escobillas” (Vergara, y otros, 2016, pág. 23). Su ventaja es que proporcionan altas revoluciones. Pero tienen la desventaja de generar una potencia muy baja, lo que los hace idóneos para usar hélices pequeñas. Si se desea usar hélices grandes, obligatoriamente se deberá incluir una reductora para que reduzca las revoluciones y así obtener mayor fuerza en la hélice.

**Figura 41***Motor Brushless Inrunner*

*Nota:* En el grafico se ilustra la parte interna de un motor brushless inrunner. Tomado de (Llamas, 2016).

- Outrunner: “Este tipo de motor recibe el nombre de carcasa giratoria, ya que lo que gira es la carcasa exterior. Esta carcasa incorpora los imanes en su cara interna” (Vergara, y otros, 2016, pág. 23). Estos motores generan menos revoluciones que los Inrunner, pero la ventaja es que esto proporciona mayor potencia. Lo cual los hace perfectos para mover hélices de gran tamaño sin la necesidad de incluir una reductora.

**Figura 42***Motor Brushless Outrunner*

*Nota:* En el grafico se ilustra la parte interna de un motor brushless outrunner. Tomado de (Llamas, 2016).

### 2.3.2. Hélices

Las hélices son perfiles aerodinámicos giratorios que generalmente están compuestas por 2 o más palas sujetas a un eje o buje, cuya función es utilizar la potencia transmitida del motor para generar tracción o arrastre. Al igual que en los perfiles alares de los aviones, en la hélice se consigue el mismo efecto cuando se la expone al movimiento de flujos de aire, este efecto es la sustentación.

Un factor que determinará un mayor o menor rendimiento de la hélice es la densidad del aire, puesto que si esa densidad es mayor entonces la hélice generará más fuerza de sustentación.

**Figura 43**

*Hélices para drone*



*Nota:* En la imagen se observa hélices para drone. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

#### **a. Funcionamiento de la hélice**

Gracias a la potencia que transmiten los motores, las hélices al girar generan una fuerza opuesta y superior al peso del drone, esta fuerza conocida como sustentación es la que va a permitir volar la aeronave. Para entender a cabalidad el funcionamiento de la hélice se debe conocer los siguientes conceptos:

- **Factor P**

“Causado por la tercera ley de Newton: Siempre que se ejerce una fuerza (acción) resulta otra fuerza igual y de sentido contrario (reacción), este fenómeno lo conocemos como efecto par motor o factor P” (Vergara, y otros, 2016, pág. 24). Las hélices al girar no solamente generan una fuerza vertical hacia arriba, sino que también se generará una fuerza horizontal que hará que el drone gire sobre sí mismo.

Para compensar el efecto del factor P, en los drones se utilizan hélices contrarrotatorias, es decir, que se disponen de dos hélices diferentes en cuanto a la dirección de las palas y además los motores también rotarán en distinta dirección en función de la hélice. Es así que existen motores que giran en sentido horario y en sentido antihorario. De esta manera la fuerza horizontal generada por una hélice se contrarresta con el giro opuesto de otra hélice, y así se consigue que el drone mantenga un vuelo estable y seguro.

#### **Figura 44**

##### *Hélices contrarrotatorias*



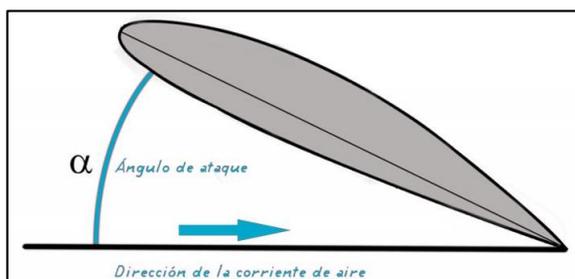
*Nota:* Estas son ejemplos de hélices contrarrotatorias ya que tienen diferente sentido de dirección en sus palas. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

- **Ángulo de ataque**

Es el ángulo comprendido entre la línea imaginaria que une el borde de ataque con el borde de salida del perfil aerodinámico (conocida como cuerda) y el viento relativo que resulta de la velocidad de rotación de la hélice. Tal como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 45**

*Ángulo de ataque*

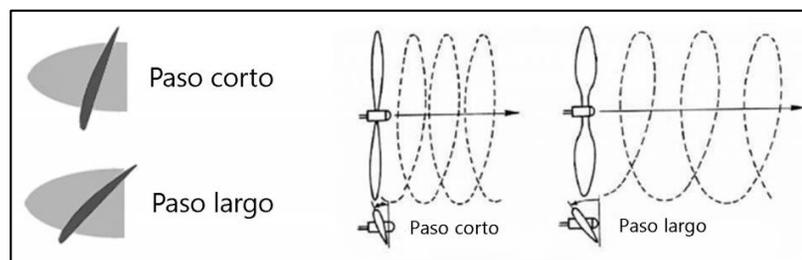


*Nota:* En la ilustración se observa como es el ángulo de ataque de una hélice. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

- **Paso de la hélice**

Corresponde al ángulo que forma la cuerda del perfil aerodinámico de la pala y su plano de giro. En otras palabras, es aquella inclinación que podemos ver en las hélices. El paso de la hélice también se lo conoce como aquella distancia que recorrería con un giro completo de 360° teóricamente penetrando una sustancia sólida. Pero la distancia real de avance de la hélice durante la práctica siempre será mucho menor, puesto que el aire es una sustancia gaseosa.

Las hélices de paso corto son ideales para vuelos lentos y estables, resultando en un menor consumo de batería. Y las hélices de paso largo son apropiadas para vuelos rápidos pero con un mayor consumo de batería.

**Figura 46***Paso de la hélice*

*Nota:* La diferencia entre el paso corto y largo es el ángulo de ataque de la hélice. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

**b. Medidas de la hélice**

Generalmente las medidas de una hélice pueden expresarse de dos maneras, según desee el fabricante de las mismas, pero que significan lo mismo, como por ejemplo: 5x4.5 ó 5045. Estos números nos indican que se trata de una hélice de 5 pulgadas de diámetro y 4.5 pulgadas de paso.

**Figura 47***Hélice de medida 23x12*

*Nota:* Esta es una hélice de 2.3 pulgadas de diámetro por 1.2 pulgadas de paso. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

- **Diámetro:** Es la distancia de punta a punta (extremo a extremo) de la hélice, normalmente expresada en pulgadas. Cabe mencionar que 1 pulgada es igual a 2.54 centímetros.

- **Paso:** El paso es la distancia que la hélice recorrería en un medio sólido realizando un giro completo de  $360^\circ$ . Esta medida también es expresada en pulgadas.
- **Sentido de giro:** Como se mencionó en el apartado referente al factor P, existen hélices que giran en sentido horario y en sentido antihorario, respecto a la dirección que tengan sus palas.
- **Peso:** El peso de las hélices viene expresado comúnmente en gramos. Esta medida varía en función del tamaño y el material del cual están fabricadas.

### c. Tipos de hélices

Existen diferentes tipos de hélices para drones que varían unas de otras en función del número de palas que tengan y de su material de fabricación. Los cuales se mencionan a continuación:

- **Por el número de palas**

- Hélices de dos palas: Se tratan de hélices cuyo buje contiene 2 palas, son el tipo más común que se utilizan en drones de gama media y gama alta.

#### Figura 48

*Hélices de dos palas*

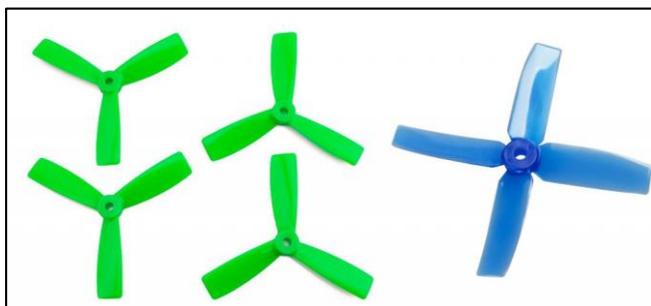


*Nota:* En la imagen se observan hélices de doble pala. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

- Hélices de tres o cuatro palas: Son hélices utilizadas para drones de carrera, drones de juguete, minidrones o drones de gama baja.

**Figura 49**

*Hélices de tres y cuatro palas*



*Nota:* En la imagen se observan hélices de 3 y 4 palas. Tomado de (Comprardronesonline, 2018)

- **Por el material**

- Plástico: Son las hélices más económicas que existen en el mercado pero poco resistentes a golpes o caídas.

**Figura 50**

*Hélices de plástico*



*Nota:* En la imagen se observan hélices de plástico. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

- Fibra de carbono: Presentan un menor rozamiento, lo que se traduce en suavidad aerodinámica y su resistencia es mayor a las de plástico.

**Figura 51**

*Hélices de fibra de carbono*



*Nota:* En la imagen se observan hélices de fibra de carbono. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

- Madera: Estas hélices ofrecen un vuelo más suave para el drone y su resistencia a ligeros golpes es óptima. Son el tipo de hélices que no se ven muy a menudo.

**Figura 52**

*Hélices de madera*

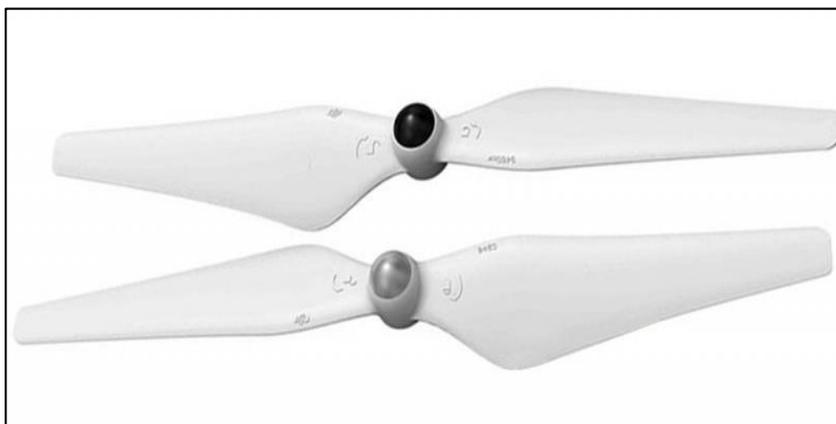


*Nota:* En la imagen se observan hélices de madera. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

- Compuestas: Este tipo de hélices están compuestas de varios materiales, sus características más relevantes las especifica cada fabricante. Aunque no son muy económicas, su precio lo vale debido a que son mucho más resistentes que los tipos de hélices mencionadas anteriormente.

**Figura 53**

*Hélice compuesta de nylon y fibra de carbono*



*Nota:* En la imagen se observan hélices de material compuesto. Tomado de (Comprardronesonline, 2018).

### 2.3.3. ESC's

El ESC (Electronic Speed Controller) o variador de velocidad es un componente indispensable para un drone, especialmente para aquellos que utilicen motores brushless en su sistema de propulsión.

Este controlador de velocidad electrónico es un circuito compuesto por varios componentes capaz de variar la velocidad y sentido de giro de un motor eléctrico sin escobillas (brushless) a través de la generación de pulsos eléctricos compatibles con esta clase de motores.

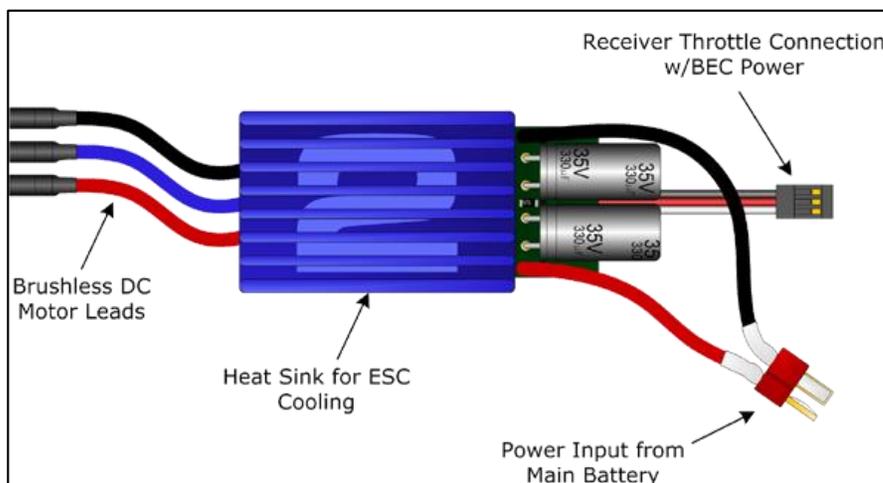
### a. Partes del ESC

- **Dos cables:** Son para la conexión positiva y negativa de la fuente de alimentación de energía eléctrica. Generalmente de colores rojo y negro.
- **Tres cables:** Se conectan con el motor para proporcionarle electricidad a través de pulsos y son tres debido a que funcionan con corrientes trifásicas. En algunos ESC estos cables son reemplazados por conectores hembra y los motores son los que vienen equipados con los cables con conector macho.
- **Un conector con 2 o 3 cables:** Sirve para la conexión con la controladora de vuelo del dron, ya que gracias a esta se reciben todos los datos necesarios para accionar el motor. El número de cables de este conector depende si el ESC tiene incluido un BEC (Battery Eliminating Circuit). Un ESC con BEC tiene 3 cables y un ESC sin BEC tiene 2 cables.

El BEC es un circuito eliminador de batería que regula un voltaje estable para hacer funcionar estos variadores de velocidad. Esto suprime la necesidad de emplear una batería adicional dentro del dron que alimente a los ESC.

Si el controlador de velocidad no tiene un BEC integrado se puede utilizar un módulo de energía aparte, el cual es una tarjeta de circuitos que toma la electricidad de la batería, regula el voltaje y lo distribuye a todos los componentes del dron. Además protege contra cortocircuitos y cumple con el mismo funcionamiento de un BEC.

- **ESC:** La parte central y principal del variador de velocidad contiene un circuito electrónico integrado que hace posible su funcionamiento. Si este posee BEC su tamaño es más grande en comparación con uno que no lo posea.

**Figura 54***Partes del ESC*

*Nota:* En la imagen se observan las partes principales de un variador de velocidad. Tomado de (FPVMAX, 2017).

**b. Funcionamiento del ESC**

A continuación se detalla paso a paso el funcionamiento de los controladores de velocidad electrónico:

- **Primero:** La controladora de vuelo principal envía los datos calculados en función de la posición del drone y la posición en la que se encuentra el stick del radiocontrol. Esta información llegará hasta el ESC gracias a su conector.
- **Segundo:** Los datos llegan al ESC y en ese preciso instante el variador tomará la energía necesaria de la fuente de alimentación (batería) gracias a sus cables de conexión.
- **Tercero:** Se produce una transformación a pulsos de la energía dentro del ESC y estos son enviados hacia el motor a través de sus 3 cables de conexión.
- **Cuarto:** El motor gira a la velocidad correcta.

### c. Elección del ESC

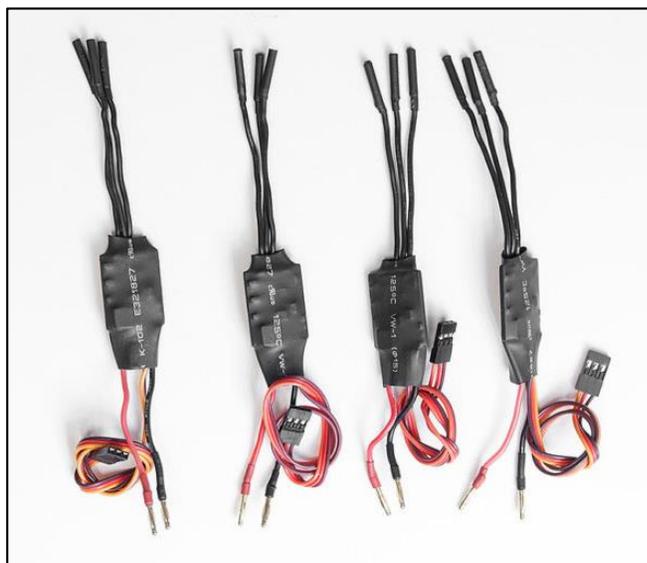
Los ESC se categorizan según la corriente máxima que pueden soportar. A mayor soporte de corriente mayor es el precio del variador. Es recomendable que al momento de elegir un ESC se lo haga optando por uno que se encuentre por encima de la demanda de corriente del motor y hélice del dron, ya que si una sobretensión daña el variador en pleno vuelo esto ocasionaría una caída en picada.

También se debe considerar que la batería sea compatible con el ESC. Para lo cual existen unas normas sencillas que se mencionan a continuación:

- Si se utiliza una batería 3S, un ESC de 12 A es más que suficiente.
- Si se utiliza una batería 4S, un ESC de 20 A como mínimo.

#### Figura 55

##### *ESC's para baterías 3S*



*Nota:* En la imagen se observan ejemplos de variadores de velocidad de 12 A idóneos para baterías tipo 3S. Tomado de (Mobus, 2019).

**Figura 56***ESC's para baterías 4S*

*Nota:* En la imagen se observa un ejemplo de variador de velocidad de 20 A idóneo para baterías tipo 4S. Tomado de (Mobus, 2019).

**2.4. Fuente de alimentación**

La fuente de alimentación de energía principal que alimenta a todos los sistemas que componen un drone o RPA (Aeronave Pilotada Remotamente) son las baterías, mismas que en el mercado existen de diferentes características, autonomía y materiales de construcción.

Las baterías son elementos que energizan a todo el conjunto de componentes que están integrados en la estructura del drone y en el radio control. Estas utilizan el método de almacenamiento químico de la energía, tal que al entrar en funcionamiento, es decir, cuando se las conecta algún aparato eléctrico, empiezan a proporcionar una corriente de salida continua con un voltaje determinado, el cual va disminuyendo con el uso y el paso del tiempo.

Actualmente se comercializan baterías desechables y recargables, pero para el caso del uso en drones, mayoritariamente se utilizan las baterías recargables, debido a que su tiempo de vida útil es muy amplio y se las puede recargar las veces que se desee para continuar utilizándolas.

Las baterías recargables, al igual que cualquier otro componente, posee ciertas características que resultan primordiales al momento de seleccionarlás y adquirirlas, para el uso que se las quiera dar.

Estas características son el voltaje, la capacidad y la velocidad de carga y descarga. Los fabricantes son los encargados de otorgar estas características a las baterías que construyen. En la siguiente figura se indica el significado de los términos generalmente escritos sobre la envoltura plástica de las baterías.

**Figura 57**

*Batería recargable para drones*



*Nota:* En la imagen se observa el significado de los términos de una batería comúnmente usada para energizar un drone. Tomado de (Comorecuperar, 2017).

### 2.4.1. Tipos de baterías

Esta clasificación se basa en los elementos químicos que son empleados para la construcción y almacenamiento de energía eléctrica dentro de las baterías, más utilizadas en los drones, y son las siguientes:

#### a. Baterías de Ni-Cd (níquel-cadmio)

Son las baterías más antiguas. Están compuestas de varias células de 1.2 voltios cada una (normalmente de seis, aportando un voltaje total de 7.2 voltios). Tienen el inconveniente de no tolerar bien las cargas rápidas y sufrir el efecto memoria.

**Figura 58**

*Batería de Ni-Cd*



*Nota:* Los componentes de esta batería son el níquel y el cadmio.

Tomado de (Telesa, 2019).

#### b. Baterías de Ni-MH (níquel-metal-hidruro)

Aparecen en la década de los noventa y sustituyen a las anteriores de níquel-cadmio. La principal ventaja de las níquel-metal-hidruro es que emplean hidruros metálicos para su reacción química en lugar del cadmio, que resultaba ser una sustancia altamente contaminante.

Además, tienen mayor capacidad de carga, menor efecto memoria y aceptan cargas rápidas. Por otro lado, soportan un menor número de cargas durante su vida útil que las de Ni-Cd y tienen una resistencia interna superior, lo que las limita para alimentar motores de alta potencia.

**Figura 59**

*Batería de Ni-MH*



*Nota:* Los componentes de esta batería son el níquel y el metal hidruro. Tomado de (Rcinnovations, 2019).

### **c. Baterías de Ion-Litio (iones de litio)**

La capacidad de estas baterías es aproximadamente del doble que la capacidad de las baterías de Níquel-Cadmio y el voltaje de cada una de sus células son de 3.7 voltios. Tienen la ventaja de que el litio, al ser el metal más ligero que existe, a igualdad de capacidad estas baterías resultan mucho más ligeras. Además, no poseen efecto memoria y tienen una baja descarga durante su almacenamiento.

Requieren de un circuito de control para limitar el voltaje máximo de cada célula de la batería, para limpiar el voltaje mínimo de descarga, controlar la temperatura y

determinar cuando la batería está cargada. Es necesario tener cuidado de no perforar una de estas baterías ya que se produciría una reacción capaz de provocar fuego o una explosión al exponerse los componentes internos con el oxígeno del aire.

**Figura 60**

*Batería de Ion-Li*



*Nota:* Los componentes de esta batería son iones de litio. Tomado de (Aliexpress, 2019).

#### **d. Baterías de Li-Po (polímero de litio)**

Son las más modernas, además de pesar poco, utilizan un polímero que les permite ser fabricadas en una mayor variedad de formas y tamaños que las baterías de ion de litio. Así, es posible aprovechar al máximo el espacio de los compartimentos del fuselaje destinados a las baterías.

Tienen una capacidad entre 5 y 12 veces las de Ni-Cd o las de Ni-MH aunque necesitan una carga mucho más lenta, además de emplear para ello cargadores digitales especiales. Al igual que las baterías de litio, el voltaje de cada elemento es de 3.7 voltios. Tampoco padecen el efecto memoria y se inflaman o explotan si entran sus componentes internos en contacto con el aire al perforarse su carcasa.

**Figura 61**

*Batería de Li-Po*



*Nota:* Los componentes internos de esta batería son polímeros de litio. Es la más utilizada en la industria de los drones. Tomado de (Electronicarc, 2019).

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO DEL TEMA

#### 3.1. Descripción general

En el presente proyecto se implementará un sistema de propulsión y un sistema de control en la estructura de un drone cuadricóptero T4, la cual será creada mediante el uso de una impresora 3D en material de fibra de carbono, que garantizará su resistencia y durabilidad.

El sistema de propulsión le permitirá al drone poder sustentarse en el aire y el sistema de control le proporcionará la capacidad de realizar las maniobras que el operador desee.

Para el ensamblaje del sistema de propulsión del cuadricóptero T4, se implementará un controlador principal, una fuente alimentación de energía y el grupo motopropulsor, el cual estará compuesto por cuatro motores eléctricos que serán los encargados de generar la fuerza de sustentación necesaria para levantar al drone de la superficie terrestre y permitirle realizar diferentes maniobras en el aire.

Con este tipo de aeronave, la cual está destinada para uso exclusivo de los estudiantes de la Carrera de Mecánica Aeronáutica, se podrá constatar de manera práctica los efectos aerodinámicos y movimientos de vuelo principales. Esto permite que los estudiantes refuercen su proceso de aprendizaje y se familiaricen con la manipulación de aeronaves no tripuladas.

### 3.2. Implementación del sistema de propulsión

La implementación del sistema de propulsión consiste en poner en práctica los conocimientos adquiridos, métodos y realización de determinados procesos para llevar a cabo el ensamblaje del grupo motopropulsor sobre la estructura de un drone cuadricóptero T4 y ponerlo en funcionamiento.

Por lo cual es necesario realizar varias tareas indispensables e importantes que garanticen un resultado final eficiente y seguro, dichas tareas se las mencionan a continuación.

**Figura 62**

*Estructura del drone cuadricóptero T4*



*Nota:* En la imagen se observa la estructura completa del cuadricóptero T4.

#### 3.2.1. Estudio de alternativas

Para la implementación del sistema de propulsión a utilizar en la estructura del drone cuadricóptero T4, se analizaron tres alternativas de motores eléctricos sin escobillas (motores brushless) diseñados y fabricados para drones.

### a. Primera alternativa: MT2213-935KV MultiStar motor

- **Descripción**

Cuentan con imanes de alta gama 45SH, rodamientos de alta calidad, 14 polos, el monte de encargo del motor y todos son de precisión equilibrada para un funcionamiento suave, estos motores están diseñados específicamente para su uso multi-rotor. El 2213 se ha construido en aluminio de montaje para una instalación rápida y fácil.

- **Parámetros del producto**

**Tabla 1**

*Parámetros MT2213-935KV MultiStar motor*

PARÁMETRO	VALOR
KV (RPM / V)	935
Batería	2-4 S LiPo
Sobretensión máx	200W
Corriente máximo	15 A
Sin corriente de carga	0.4 A
Resistencia interna	180 mΩ
Número de polos	14
Dimensiones (Dia. X L.)	28 x 26 mm
Eje del motor	3 mm
Peso	55 gr

*Nota:* Esta tabla muestra cada valor de los parámetros técnicos del motor MT2213 de 935KV, establecidos por su fabricante.

- **Factibilidad**

Este tipo de motor es uno de los más conocidos en el mercado pues es de fácil instalación, tiene una buena durabilidad, es excelente para su uso en cuadricópteros y ha sido diseñado para un rendimiento de respuesta transitoria rápida. Compatible con hélices 8x4.5 o 10x4.5, además posee un precio accesible.

**Figura 63**

*MT2213-935KV MultiStar motor*



*Nota:* En la imagen se observa un motor MT2213 de 935 KV.

Tomado de (Hobbyking, 2019).

**b. Segunda alternativa: T-Motor AIR2213 920KV**

- **Descripción**

Los motores AIR2213 920KV son ideales para multicopteros de 1200gr a 1500gr, poseen un nivel bajo de ruido y generan una velocidad alta, además su instalación es rápida y no presenta mayor dificultad durante su montaje. Se constituye como el tipo de motor perfecto para cuadricópteros, DJI Phantom, F450 y F550.

- **Parámetros del producto**

**Tabla 2***Parámetros T-Motor AIR2213 920KV*

PARÁMETRO	VALOR
KV (RPM / V)	920
CW/CCW	Si
Diámetro del estator	22 mm
Longitud del estator	13 mm
Diámetro del eje	4 mm
Diámetro del motor	27.5 mm
Longitud del motor	30 mm
Peso	54 gr
Corriente de reposo (10 V)	0.5 A
Batería (número de celdas)	3-4 S LiPo
Corriente continua máxima (180S)	18 A
Potencia continua máxima (180S)	230 W
Corriente de eficiencia máxima	(3-10A)>83%
Resistencia interna	132 mΩ
No. de brazos del estator (N)	9
No. de polos del estator (P)	12

*Nota:* Esta tabla muestra cada valor de los parámetros técnicos del motor AIR2213 de 920KV, establecidos por su fabricante.

- **Factibilidad**

Este motor posee un adaptador de apoyo integrado lo que proporciona una instalación simple y única sobre la estructura del dron, además está equipado con auto-enfriamiento para reducir la temperatura, y su adaptador CW (Clockwise) y CWW (Counter clockwise) combina perfectamente con la hélice T9545, lo cual resulta en un conjunto altamente eficiente. Posee un precio aproximado de 55 dólares.

**Figura 64**

*T-Motor AIR2213 920KV*



*Nota:* En la imagen se observa un motor AIR2213 de 920 KV.

Tomado de (Dekasto, 2019).

**c. Tercera alternativa: 880KV MOTOR AC2836-358**

- **Descripción**

Motor sin escobillas de 880KV para multi rotores como QuadCopters, HexaCopters y OctoCopters. Este es el motor ArduCopter 880KV que se utiliza para cargas más pesadas en quadcopters y hexacopter. Es un motor muy confiable y es más grande que su contraparte 850KV, ofrece un nivel de empuje muy alto con las hélices de 12x45.

- **Parámetros del producto**

**Tabla 3**

*Parámetros 880KV MOTOR AC2836-358*

PARÁMETRO	VALOR
Tamaño	28 X 36 mm
Eje	4 mm
KV (RPM / V)	880
Hélice	12x47
Batería	2-4 S LiPo
Peso	72 gr
Cables	35 cm / 18 AWG
Accesorios	bullets, propeller adapter, shrink tubes
Alimentación continua	7.4 a 11.1 V
Potencia máxima	248 W

*Nota:* Esta tabla muestra cada valor de los parámetros técnicos del motor AC2836 de 880KV, establecidos por su fabricante.

- **Factibilidad**

Este es un motor generalmente usado para cargas útiles más pesadas, que se lo puede utilizar en drones y también en helicópteros de radio control. Está diseñado para hélices de 12x47 u 11x47. Este motor ahora viene con un nuevo adaptador de pinza, es un eje roscado M5x0.8 con un sujetador de tuerca. Posee un precio aproximado de 25 dólares por unidad.

**Figura 65***880KV MOTOR AC2836-358*

*Nota:* En la imagen se observa un motor AC2836 de 880 KV. Tomado de (Byod, 2019).

### **3.2.2. Matriz de decisión**

#### **a. Criterios de evaluación**

En la Tabla 4, se puede observar la ponderación otorgada a cada una de las tres alternativas mencionadas en el apartado anterior, para lo cual se determinó que la escala de evaluación es de 1 a 10, donde:

- 1 a 5 = malo
- 6 a 8 = bueno
- 9 a 10 = excelente

El número de mayor rango en la sumatoria total será la mejor alternativa seleccionada para realizar la implementación del sistema de propulsión en la estructura del drone cuadricóptero T4.

**Tabla 4***Criterios de evaluación*

PARÁMETROS	TIPOS DE SISTEMAS			PONDERACIÓN	RESULTADOS		
	MT2213-935KV MultiStar motor	T-Motor AIR2213 920KV	880KV MOTOR AC2836-358		MT2213-935KV MultiStar motor	T-Motor AIR2213 920KV	880KV MOTOR AC2836-358
<b>Peso</b>	5	10	8	0.3	1.5	3	2.4
<b>Tamaño</b>	6	10	8	0.1	0.6	1	0.8
<b>Potencia máxima</b>	8	9	9	0.2	1.6	1.8	1.8
<b>Facilidad de instalación</b>	8	10	10	0.2	1.6	2	2
<b>Seguridad</b>	10	10	10	0.1	1	1	1
<b>Costo</b>	7	9	8	0.1	0.7	0.9	0.8
<b>TOTAL</b>				1	6.63	<b>9.7</b>	8.8

*Nota:* Esta tabla muestra la ponderación establecida a cada parámetro de las tres alternativas de motores evaluados, de los cuales se elegirá aquel que tenga el mayor resultado total.

#### **b. Alternativa seleccionada**

Por medio del estudio realizado, se observó que el motor T-Motor AIR2213 920KV (segunda alternativa) cuenta con las mejores características acorde a las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4. Este motor brushless genera 920 revoluciones por minuto, con una potencia continua máxima de 230 W, con lo cual es capaz de proporcionar el empuje necesario para sustentar el drone con todos sus componentes instalados. Además el peso de 54 gramos resulta conveniente al peso total de la estructura, pues al tener un peso ligero se emplea menos energía para poder volarlo.

Otra de las ventajas del motor T-Motor AIR2213 920KV es que cuenta con CW/CCW (Clockwise / Counter clockwise), característica que nos permite ajustar las hélices en sentido horario o en sentido antihorario, lo cual resulta más práctico y fácil durante la calibración de funcionamiento del grupo motopropulsor.

### 3.2.3. Descripción de componentes

Los motores T-Motor AIR2213 920KV que previamente fueron seleccionados en base a sus ventajosas especificaciones que encajan perfectamente con las características técnicas del drone cuadricóptero T4, son motores sin escobillas (motores brushless) que actualmente en el mercado se los puede adquirir como un kit.

El Kit Multirotor T-Motor AIR 350 es un conjunto de componentes para el sistema de propulsión de drones multirrotores, el cual está compuesto de 4 motores AIR2213 de 920KV, 4 hélices T9545 y 4 controladores de velocidad electrónico AIR20A, que operando juntos funcionan perfecta y eficientemente.

#### Figura 66

*T-Motor AIR 350 Multirotor Kit*



*Nota:* En la imagen se muestra el kit multirrotores AIR 350 de la marca Air Gear, adquirido.

### a. Motores AIR2213 920KV

Son motores brushless de alta velocidad que producen bajo ruido, de fácil y rápida instalación. Dos de los 4 motores que vienen en el kit tienen un punto plateado en la parte superior del eje que muestra que están en sentido antihorario, por tanto resulta más conveniente identificar el motor adecuado para el proceso de ensamblaje. Las características más relevantes de este motor son las siguientes:

**Tabla 5**

*Especificaciones del motor AIR2213 920KV*

ESPECIFICACIÓN	VALOR
Revoluciones por minuto / Voltio	920 KV
Dimensión del estator	22 x 13 mm
Peso	54 gr
Idle current	0.5 A @ 10 V
Fuente de alimentación	3-4 S LiPo
Corriente de trabajo continua máxima	18 A (durante 180 segundos)
Potencia continua máxima	230 W
Corriente de eficiencia máxima	3 – 10 A; > 83%
Resistencia interna	132 mΩ

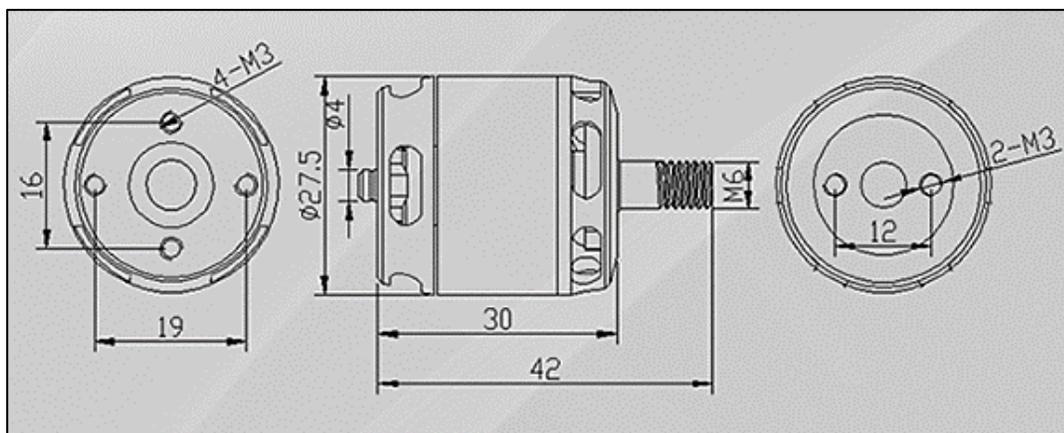
*Nota:* Esta tabla muestra las características más contundentes del motor AIR2213 920KV.

Además, este tipo de motor posee ciertas ventajas que lo diferencian de los otros existentes en el mercado, las cuales se mencionan a continuación:

- Adaptador de hélice integrado que permite una instalación simple y única.
- Auto enfriamiento que reduce la temperatura de funcionamiento.
- Adaptador CW y CCW que combina perfectamente con la hélice T9545.

**Figura 67***Motores AIR2213 920KV*

*Nota:* En la imagen se observan los 4 motores AIR2213 adquiridos para el dron cuadricóptero T4.

**Figura 68***Dimensiones del Motor AIR2213 920KV*

*Nota:* En el diagrama se muestran las medidas exactas del motor AIR2213 920KV. Tomado de (Dekasto, 2019).

Las especificaciones técnicas de rendimiento y eficiencia establecidas por el fabricante de los motores AIR2213 920KV se pueden observar en la siguiente figura:

**Figura 69**

*Especificaciones de rendimiento del motor AIR2213 920KV*

Item No.	Voltage, V	Prop	Throttle	Current, A	Power, W	Thrust, g	RPM	Efficiency, g/W
AIR 2213 KV920	11.1	T9545	50%	2	22.2	240	4400	10.81
			65%	3.8	42.18	386	5900	9.15
			75%	5.5	61.05	490	6900	8.03
			85%	7.2	79.92	594	7800	7.43
			100%	9.8	108.78	722	8300	6.64
	12		50%	2.3	27.6	278	4800	10.07
			65%	4.4	52.8	445	6300	8.43
			75%	6.2	74.4	568	2200	7.63
			85%	8.1	97.2	679	8100	6.99
			100%	10.9	130.8	813	8900	6.22
	14.8		50%	3.3	48.84	403	5700	8.25
			65%	6.2	91.76	636	7600	6.93
			75%	8.4	124.32	786	8600	6.32
			85%	10.7	158.36	907	9500	5.73
			100%	14.3	211.64	1084	10200	5.12

*Nota:* En la imagen se detallan las especificaciones de rendimiento del motor AIR2213 920KV para el tipo de hélice T9545. Tomado de (Dekasto, 2019).

#### **b. Hélices T9545**

Las hélices T9545 autoajustables son altamente eficientes con los motores AIR2213 920KV, están fabricadas en material compuesto, capaces de generar una fuerza de sustentación más que necesaria para levantar en vuelo cuadricópteros de 1200 gr a 1500 gr de peso. Otras características de este tipo de hélices son las que se mencionan a continuación:

- Tamaño: 9.5 pulg de diámetro x 4.5 pulg de paso.
- Tamaño del orificio central: 6 mm.
- El soporte de bala completamente negro es para rosca CW.
- El soporte de bala negro con un anillo plateado es para rosca CCW.
- Perfectamente balanceadas de fábrica.

- Proveen una mejor experiencia de vuelo por su baja inercia.
- Tienen auto bloqueo que evita su desajuste en vuelo.

### **Figura 70**

*Hélices T9545*



*Nota:* En la imagen se observan las hélices T9545 adquiridas para el drone cuadricóptero T4.

Estas hélices además poseen tres métodos de instalación innovadores que son adecuados para la mayoría de motores que existen en el mercado (métodos normales o sin herramientas de auto bloqueo), los cuales son:

- Por presión de tuerca.
- Por presión de sujeción.
- Autoajustable con soporte de bala (CW, CCW).

### **c. ESC's AIR20A**

El Electronic Speed Controller o Controlador de Velocidad Electrónico AIR20A 3-4S LiPo es el componente encargado de regular y proporcionar la energía necesaria a los motores para controlar la velocidad de rotación que estos generen. Posee las siguientes características:

**Tabla 6***Especificaciones del ESC AIR20A*

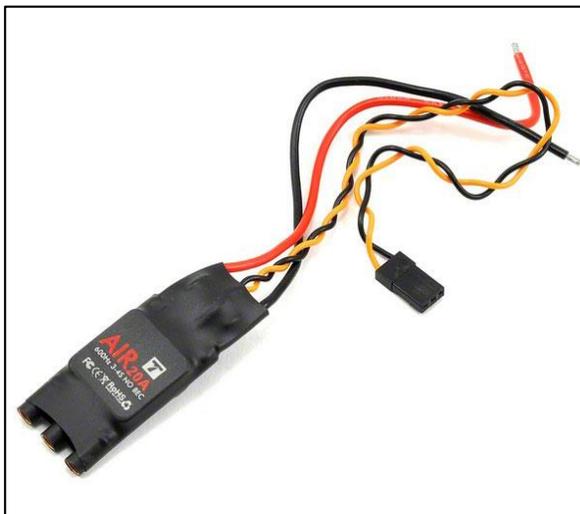
ESPECIFICACIÓN	VALOR
Corriente continua	20 A
Corriente de pico	30 A (durante 10 segundos)
BEC	No
Fuente de alimentación	3-4 S LiPo
Ítem programable	Sincronización (alta / intermedia)
Peso	14 gr
Tamaño	52.4 x 21.5 x 7 mm

*Nota:* Esta tabla muestra las características dadas por el fabricante de los ESC AIR20A.

Recuperado de (Robotshop, 2020).

Además, este tipo de controlador de velocidad posee ciertas ventajas que lo diferencian de los otros existentes en el mercado, las cuales se mencionan a continuación:

- Diseño óptimo para multirrotores sin BEC (Battery Eliminating Circuit).
- Firmware optimizado para una frecuencia de actualización de 600 Hz.
- Resistencia interna ultra baja.
- Diseño anti interferencia.
- Respuesta optimizada del acelerador.
- Peso ligero.
- Estructura compacta.

**Figura 71***ESC AIR20A 3-4S LiPo*

*Nota:* En la imagen se observa uno de los 4 ESC AIR20A adquiridos para el drone cuadricóptero T4.

#### **d. Batería LiPo Turnigy 5000mAh**

La batería es la encargada de suministrar energía eléctrica a todo el sistema de propulsión del drone, para lo cual, según las especificaciones técnicas del drone cuadricóptero T4 y las especificaciones dictadas por parte del fabricante de los motores seleccionados, se empleará una batería LiPo de 5000 mAh de la marca Turnigy.

Las baterías Turnigy son reconocidas en todo el mundo debido a su excelente rendimiento, precio accesible y fiabilidad. Están equipadas con cables de descarga de servicio pesado para soportar altas cargas de corriente y minimizar la resistencia. Son ideales para aplicaciones en robots, drones, aeromodelos y vehículos de radio control.

Las especificaciones técnicas establecidas por el fabricante de este tipo de batería se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 7**

*Especificaciones de la batería LiPo Turnigy 5000 mAh*

ESPECIFICACIÓN	VALOR
Capacidad	5000 mAh
Configuración	3S1P / 11.1 V / 3 Cell
Descarga constante	30 C
Descarga máxima (10 seg)	40 C
Peso	360 gr
Tamaño	143 x 52 x 23 mm
Enchufe de carga	JST-XH
Enchufe de descarga	XT60

*Nota:* Esta tabla muestra cada valor de las especificaciones técnicas de la batería LiPo Turnigy de 5000 mAh. Recuperado de (Tdrobótica, 2020).

**Figura 72**

*Batería LiPo Turnigy 5000 mAh*



*Nota:* En la imagen se observa la batería LiPo de 5000 mAh adquirida para el drone cuadricóptero T4.

### e. Módulo de energía PDB-XT60

Este módulo es una placa de distribución de energía eléctrica que toma la corriente de la batería y la distribuye a los controladores de velocidad electrónico de los motores y al controlador de vuelo principal del drone cuadricóptero T4.

Para cumplir con las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4 se ha seleccionado el módulo PDB-XT60 de la marca Matek Systems, debido a que es una placa eficiente, segura, diseñada específicamente para cuadricópteros, compatible con la batería LiPo Turnigy de 3 celdas y compatible con los ESC AIR20A 3-4S. Posee las siguientes especificaciones:

**Tabla 8**

*Especificaciones del módulo PDB-XT60*

ESPECIFICACIÓN	VALOR
Conector para batería	XT60 hembra
Rango de voltaje de entrada	9 - 18 V CC (LiPo 3-4S)
Salidas reguladas	5 y 12 V
Indicadores de potencia LED	Salidas de 5 y 12 V
Salidas ESC	6 pares
Almohadillas VCC/GND	1 par
Dimensiones	50 x 36 x 4 mm (sin XT60)
Peso	7.5 gr (sin XT60), 11 gr (con XT60)
Corriente continua (salidas ESC)	25 A por 4 ó 15 A por 6
Corriente máxima (salidas ESC)	30 A por 4 ó 20 A por 6 (10 seg/min)

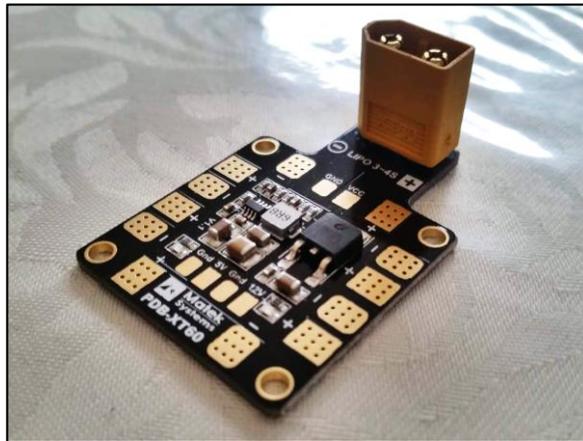
*Nota:* Esta tabla muestra los valores de las especificaciones técnicas del módulo PDB-XT60, establecidos por su fabricante.

Además, este tipo de placa de distribución de energía posee ciertas ventajas que la diferencian de las otras existentes en el mercado, las cuales se mencionan a continuación:

- Tolerante a cortocircuitos.
- Salida BEC de 5 V diseñado para receptores RC, controladores de vuelo, OSD y servos. Con corriente continua de 2 A (máx. 2.5A 10seg/min).
- Salida BEC de 12 V diseñado para cámara de video TX o FPV con regulador lineal. Con corriente continua de 500 mA (máx. 0.8A 5seg/min).

### Figura 73

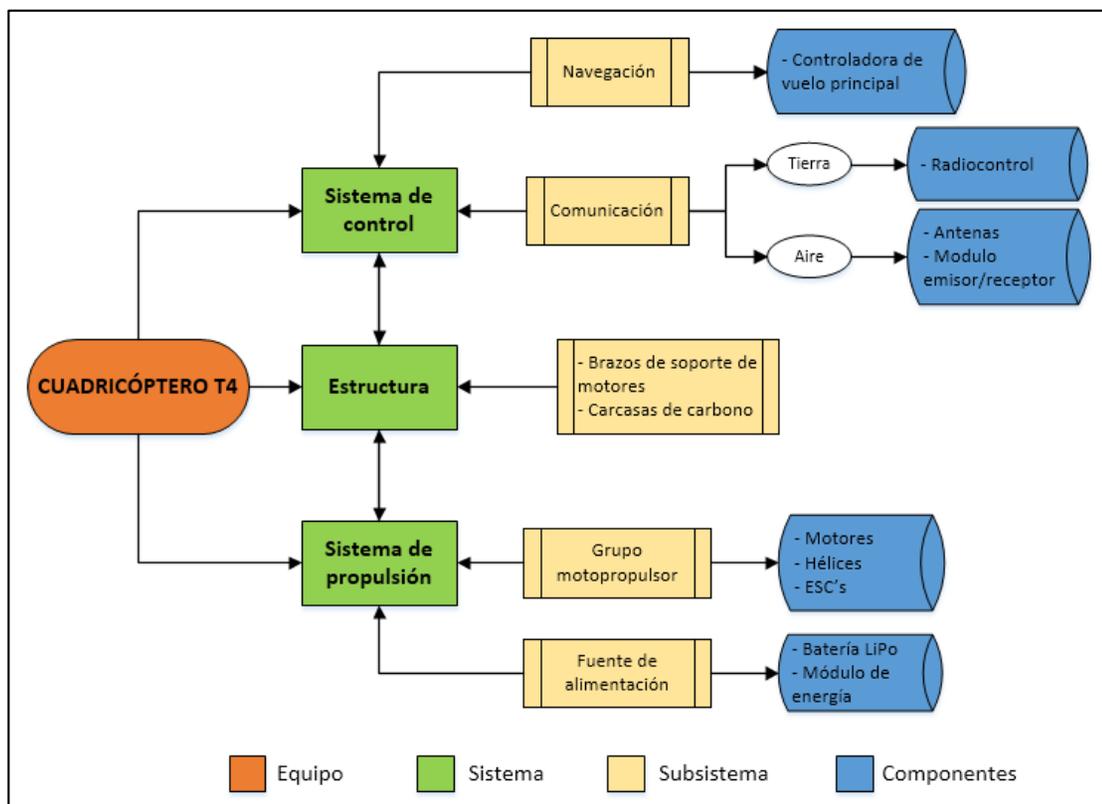
*Módulo PDB-XT60*



*Nota:* En la imagen se observa el módulo de energía PDB-XT60 adquirido para el drone cuadricóptero T4.

### 3.3. Interacción de los sistemas del cuadricóptero T4

Los sistemas, subsistemas y componentes que integran el drone cuadricóptero T4 para su correcto y eficiente funcionamiento se detalla a continuación en forma de un diagrama esquemático elaborado en el programa Visio Professional 2013.

**Figura 74***Interacción de los sistemas del cuadricóptero T4*

*Nota:* En el diagrama se detalla la interacción de los sistemas que componen el drone cuadricóptero T4.

### 3.3.1. Sistema de propulsión

El sistema de propulsión que es el encargado de generar el empuje y fuerza de sustentación necesaria para volar el drone, cumple el mismo rol de importancia al igual que los sistemas de control y estructural. Está compuesto por dos subsistemas denominados grupo motopropulsor y fuente de alimentación.

Al grupo motopropulsor lo componen principalmente 4 motores eléctricos brushless AIR2213 de 920 KV, en los cuales se instala una hélice T9545 por cada motor y un controlador de velocidad electrónico AIR20A 3-4S LiPo

Con lo cual este subsistema queda totalmente ensamblado y para poder energizarlo entra en funcionamiento la fuente de alimentación, la cual se trata de una batería LiPo Turnigy de 5000 mAh que va conectada al módulo de energía, quien es el encargado de repartir la corriente eléctrica a todos los sistemas.

Cabe recalcar que este tipo de conexión permite que los motores reciban una corriente eléctrica adecuada para protegerlos de una sobretensión que pueda averiarlos.

Todo este sistema de propulsión a la vez va conectado con el sistema de control, en donde gracias a su controlador principal, el cual se trata de un controlador Pixhawk PX4, se pueden procesar y llevar a cabo todas las órdenes de movimientos de vuelo emitidas por el operador en tierra gracias al uso de un radiocontrol, el cual se trata de un control Flysky FS-i6.

### **3.4. Proceso de ensamblaje**

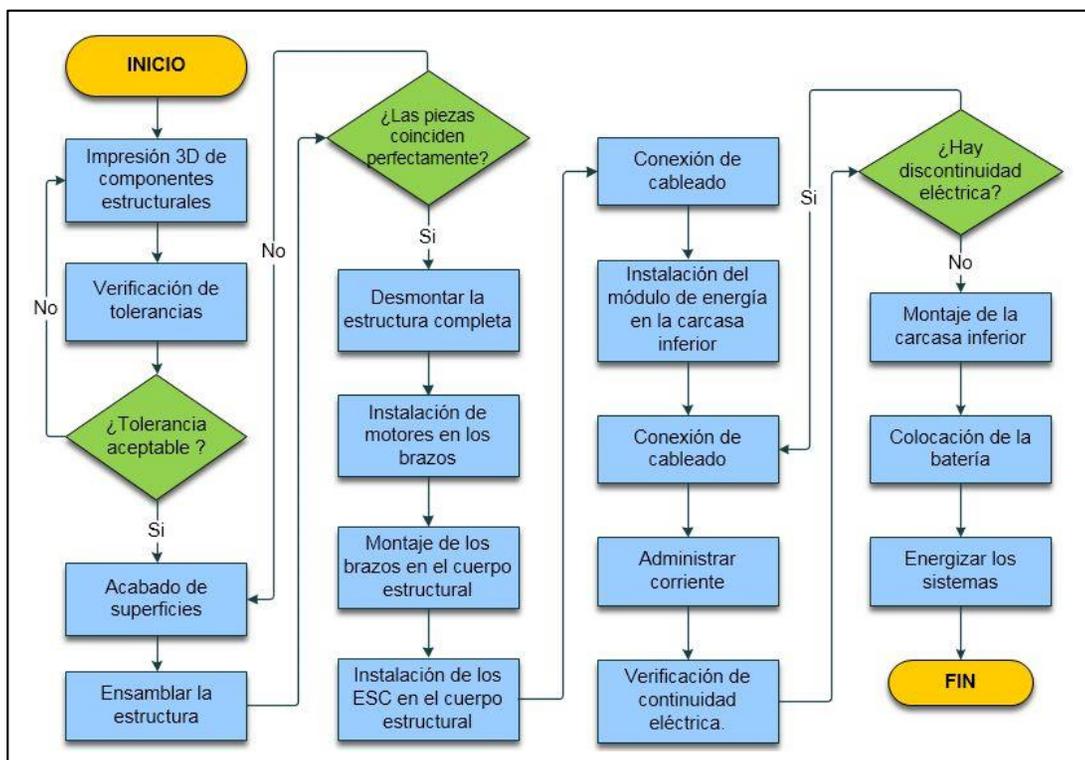
El proceso de ensamblaje es el conjunto de tareas y verificaciones que se llevan a cabo para montar o ensamblar todos los componentes y accesorios que integran los sistemas del drone cuadricóptero T4.

Este procedimiento se lo debe realizar de manera minuciosa paso a paso, puesto que de cada detalle dependerá posteriormente el buen funcionamiento, eficacia y la seguridad de la aeronave.

En la siguiente figura se describe el proceso de ensamblaje del sistema de propulsión del drone cuadricóptero T4, a través de un diagrama de flujo elaborado en el programa Visio Professional 2013.

**Figura 75**

*Proceso de ensamblaje del cuadricóptero T4*



*Nota:* En el diagrama se detalla el proceso de ensamblaje de los componentes del sistema de propulsión para el drone cuadricóptero T4.

### 3.4.1. Estructura del cuadricóptero T4

Una vez concluida la impresión 3D de cada uno de los componentes estructurales del drone cuadricóptero T4, se realizó una verificación de tolerancias de resistencia del material y se dio el acabado necesario a todas las superficies, así se tienen listas todas las partes necesarias para los procedimientos que se desee llevar a cabo. Es indispensable que las piezas estén bien fabricadas, puesto que son el soporte principal para los demás componentes eléctricos y electrónicos que irán montados. Posteriormente se realizó una inspección visual y se procedió al ensamblaje de la estructura del drone siguiendo paso a paso la guía técnica del cuadricóptero T4.

**Figura 76**

*Componentes estructurales del drone*



*Nota:* En la fotografía se muestran los componentes estructurales del cuadricóptero T4.

Primero se tienen que ensamblar los brazos de la estructura con el cuerpo principal, para lo cual se introdujo los 4 brazos del drone dentro de los orificios ubicados en los lados del cuerpo principal, se insertan hasta hacer coincidir los agujeros para los tornillos de sujeción, cada brazo posee 2 agujeros en la parte superior y 2 en la parte inferior. Después se colocó la carcasa inferior debajo del cuerpo principal y la tapa superior sobre el mismo cuerpo, teniendo siempre en cuenta que los agujeros para los tornillos coincidan entre cada una de las piezas. Finalmente se introdujeron los tornillos en cada uno de los agujeros y a su vez se colocaron las tuercas para que la sujeción de la estructura sea óptima.

Cabe recalcar que este procedimiento de ensamblaje estructural se los realizó únicamente para verificar que las piezas coincidan perfectamente unas con otras para formar un todo. Puesto que es necesario desmontar la estructura cuando se vaya a instalar los sistemas de propulsión y control del drone.

### **Figura 77**

#### *Estructura ensamblada*



*Nota:* En la fotografía se muestran la estructura ensamblada del cuadricóptero T4.

### **3.4.2. Montaje del sistema de propulsión**

#### **a. Instalación de los motores**

Para realizar la instalación de los motores AIR 2213 920 KV se colocó cada motor en el orificio ubicado en el extremo de cada brazo de la estructura del drone, la conexión eléctrica por cableado se la realizó por la parte interna de los brazos hasta llegar al cuerpo principal (ver Figura 79).

Posteriormente se atornillaron los motores a la estructura para que queden fijos y seguros (ver Figura 80), y finalmente se procedió a colocar los brazos en el cuerpo del cuadricóptero, se montó la tapa superior de la estructura y se atornilló todo para que estos queden sujetos (ver Figura 81).

**Figura 78**

*Cableado*



*Nota:* En la fotografía se muestra el cableado de los motores.

**Figura 79**

*Motor en el brazo estructural*



*Nota:* En la fotografía se muestran un motor en el brazo tubular.

**Figura 80**

*Sujeción del motor*



*Nota:* En la fotografía se observa el ajuste de los tornillos de un motor.

Durante este procedimiento se colocaron las hélices para verificar que al momento de apretarlas no se movieran o desajustaran los motores. Al momento de encender los motores para las pruebas de funcionamiento respectivas se las retiran por razones de seguridad.

**Figura 81**

*Brazos asegurados en el cuerpo*



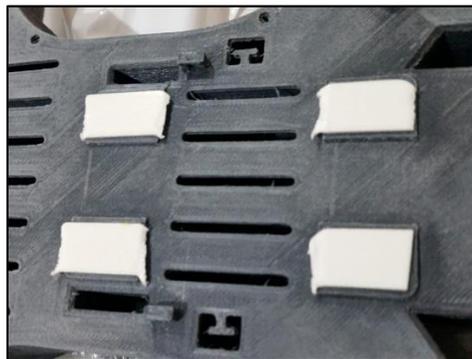
*Nota:* En la imagen se observa los brazos con los motores ensamblados al cuerpo principal.

## b. Instalación de los ESC's

Los 4 controladores de velocidad electrónicos van instalados en el cuerpo principal de la estructura del cuadricóptero, para lo cual se colocó cinta doble faz de alta adhesión en el mismo (ver Figura 82) y luego se procedió a montar los ESC's sobre la cinta ejerciendo una ligera presión para que se adhiran correctamente (ver Figura 83)

**Figura 82**

*Cinta doble faz*



*Nota:* En la fotografía se observa la cinta doble faz colocada en el cuerpo principal.

**Figura 83**

*ESC's adheridos*

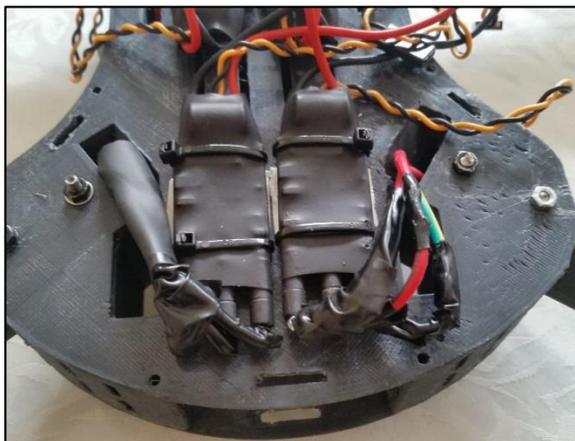


*Nota:* En la fotografía se observan los ESC's adheridos al cuerpo principal.

Finalmente se conectó el cableado de los motores a los conectores de los controladores de velocidad electrónico y se aseguraron todas las vías de cable con cinta termo-retráctil para mantenerlos ordenados y aislados (ver Figura 84).

### **Figura 84**

*Cableado de los ESC's*



*Nota:* En la fotografía se observa los ESC conectados al cableado.

### **c. Instalación del módulo de energía**

El módulo de energía encargado de repartir la corriente eléctrica a los componentes del sistema de propulsión se lo instaló en la carcasa inferior de la estructura del drone, asegurado con 4 tornillos.

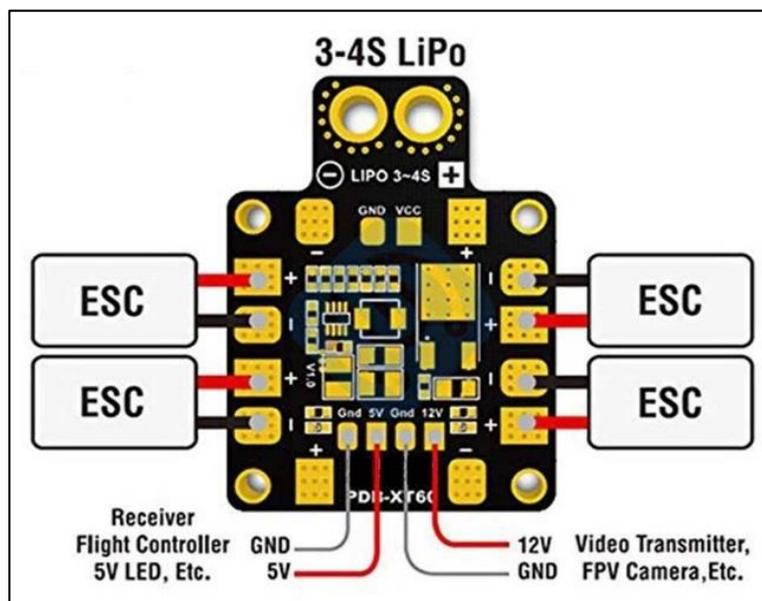
Posterior se procedió a soldar con estaño los terminales positivo y negativo de cada ESC en el módulo, los cables de corriente del controlador de vuelo y también se soldó un cable conector para la batería, cuyo terminal queda expuesto fuera de la estructura.

En este instante se administró corriente en todo el sistema para verificar con el multímetro que exista continuidad eléctrica en los puntos donde se realizó la soldadura.

Finalmente se atornilló la carcasa inferior y la batería se la colocó dentro del compartimiento ubicado en el cuerpo principal de la estructura del dron. Para energizar todos los componentes solo se conecta el plug de la batería con el cable conector del módulo de energía.

**Figura 85**

*Conexión del módulo de energía*



*Nota:* En la imagen se muestra la conexión eléctrica del módulo de energía del cuadricóptero T4.

#### **d. Instalación de las hélices**

Una vez instalados todos los componentes previos, finalmente se colocaron las hélices en cada motor según corresponda, ajustando manualmente 2 hélices en sentido antihorario y 2 hélices en sentido horario.

Cada motor y cada hélice poseen su respectiva señalética para saber cuál es la hélice que corresponde a dicho motor y en qué sentido debe ser ajustada.

**Figura 86**

*Instalación de las hélices*



*Nota:* En la fotografía se observa una de las 4 hélices del cuadricóptero ajustada en su respectivo motor.

**Figura 87**

*Sistema de propulsión ensamblado*



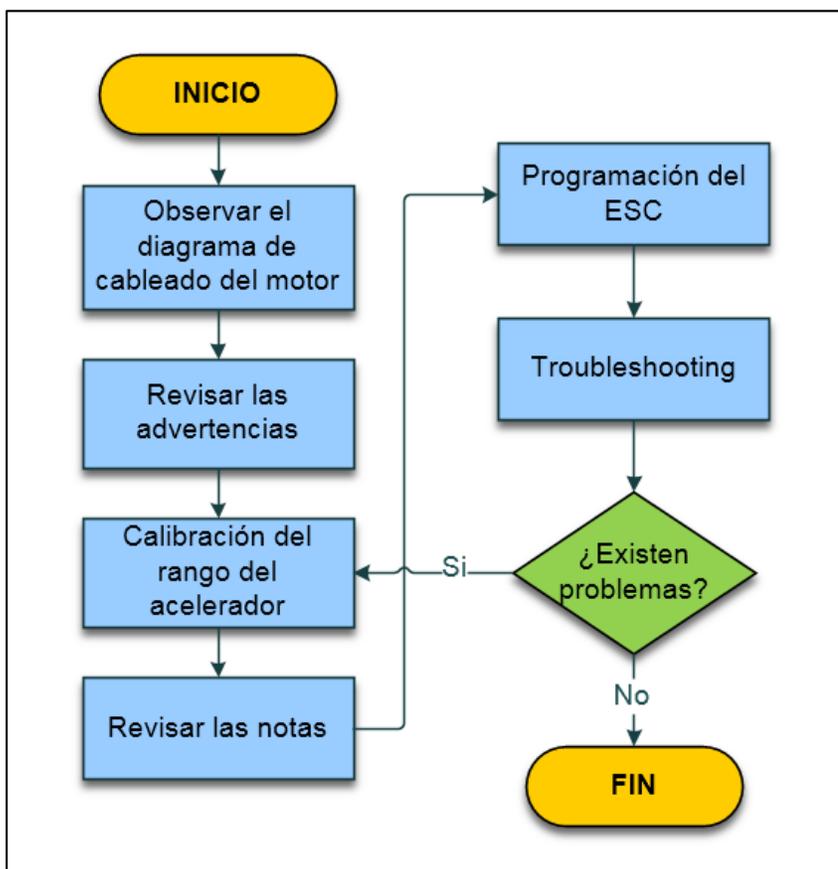
*Nota:* En la fotografía se observa el sistema de propulsión ensamblado en la estructura del drone cuadricóptero T4.

### 3.5. Descripción de procedimientos de calibración y mantenimiento

En el diagrama de flujo presentado en la Figura 88 se detalla el procedimiento en general pero indispensable que debe realizarse para calibrar los ESC conjuntamente con los motores, utilizando el transmisor o radiocontrol del cuadricóptero T4. A la vez, el troubleshooting (solucionador de problemas) sirve como una tarea de mantenimiento para detectar problemas relacionados con los componentes del sistema de propulsión y así poder resolverlos.

**Figura 88**

*Proceso de calibración y mantenimiento*



*Nota:* El diagrama detalla el proceso de calibración y mantenimiento del sistema de propulsión.

### 3.5.1. Calibración del acelerador y programación

A continuación se detallan los pasos a seguir para la correcta calibración de los controladores de velocidad electrónico AIR20A del cuadricóptero, según lo establece el fabricante de los mismos.

**Figura 89**

*Especificaciones del ESC AIR20A*

Model	Con. Current	Peak Current (10S)	BEC	LiPo	Programmable Item	Weight	Size (L*W*H)	Typical Applications (For reference)
AIR 10A	10A	15A	NO	2-3S	Timing (High/Intermediate)	6.5g	36.5x16.4x4.1	250 Class Quadcopter
AIR 20A	20A	30A	NO	3-4S	Timing (High/Intermediate)	14g	52.4x21.5x7	330/450 Class Quadcopter
AIR 40A	40A	60A	NO	2-6S	Timing (High/Intermediate)	26g	68x25x8.7	550/650 Class Quadcopter

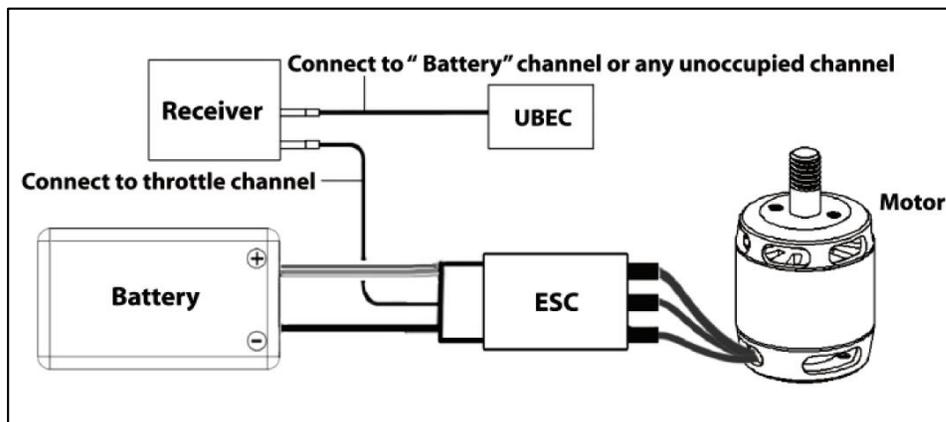
*Nota:* En la imagen se muestra las especificaciones del ESC AIR20A empleado en el cuadricóptero T4. Tomado de (Robotshop, 2020).

- Los usuarios deben calibrar el rango del acelerador cuando comienzan a usar un nuevo AIR Brushless ESC u otro transmisor.
- Los usuarios pueden cambiar la configuración de sincronización cuando se produce alguna anomalía en el ESC que conduce el motor tipo disco o cuando necesitan que el motor alcance un RPM más alto.

Nota: La sincronización intermedia es la configuración predeterminada.

#### a. Paso 1: Cableado del motor

Es indispensable observar, analizar y entender el diagrama de conexión de cada motor que compone el sistema de propulsión del dron para verificar que el mismo se encuentre en condiciones óptimas antes de seguir con los siguientes pasos.

**Figura 90***Cableado del ESC al motor*

*Nota:* En el diagrama se ilustra el tipo de conexión de los componentes del sistema de propulsión. Tomado de (Robotshop, 2020).

#### **b. Paso 2: Calibración del rango del acelerador**

- Encender el transmisor, mover el stick del acelerador a la posición superior.
- Conectar el receptor a la batería, asegurarse de que el transmisor y el receptor estén bien enlazados, y luego encender el ESC.
- Después de que el motor emite dos pequeños "Beep-beep", mover el stick del acelerador a la posición inferior en 3 segundos.
- El acelerador está calibrado.

Advertencia: Se recomienda encarecidamente remover las hélices por su propia seguridad y la seguridad de quienes lo rodean antes de realizar las funciones de calibración y programación con este sistema.

#### **c. Paso 3: Programación del ESC**

- Encender el transmisor, y luego mover el stick del acelerador a la posición superior.

- Conectar el receptor a la batería y asegurarse de que el transmisor y el receptor estén bien enlazados, y luego encender el ESC.
- El motor emitirá diferentes tonos circularmente.
- “Beep-beep”: Calibración del acelerador.
- “Beep-beep-beep”: Sincronización intermedia.
- “Beep-beep-beep-beep”: Alta Sincronización.

Si el stick del acelerador es movido a la posición inferior 3 segundos después de escuchar los pitidos correspondientes, entonces la programación de ese ítem está completa.

- La programación ha finalizado y el ESC está listo para funcionar.

Notas: En términos generales, la sincronización intermedia es aplicable a la mayoría de motores y brinda mayor eficiencia con menor calor a los motores y controladores de velocidad. La sincronización alta puede aumentar las RPM del motor, pero también aumenta la temperatura del motor. Realizar un vuelo de prueba en tierra y asegurarse de que todo funcione correctamente primero, luego volar la aeronave hacia el cielo.

### **3.5.2. Troubleshooting**

El troubleshooting o solucionador de problemas es una tarea de mantenimiento que el fabricante de los motores a establecido en base a un estudio de los fallos o problemas más comunes que se pueden presentar, pero que son solucionables.

En la siguiente tabla se especifica el problema, el tono de advertencia, la posible causa y la solución a dicho problema:

**Tabla 9***Troubleshooting del ESC AIR20A*

<b>PROBLEMA</b>	<b>TONO DE ADVERTENCIA</b>	<b>POSIBLE CAUSA</b>	<b>SOLUCIÓN</b>
<b>EI ESC no pudo arrancar el motor.</b>	“Beep beep beep...” (El motor emite un pitido rápidamente)	El stick del acelerador no está en la posición inferior.	Mover el stick del acelerador a la posición inferior o recalibrar el rango del acelerador.
<b>EI ESC no pudo arrancar el motor.</b>	“Beep, beep, beep...” (Intervalo de tiempo es de 1 segundo)	No hay señal de salida desde el canal del acelerador en el receptor.	Comprobar si el transmisor y el receptor están bien unidos; Comprobar si el cable del acelerador se ha enchufado correctamente en el canal del acelerador en el receptor.
<b>EI ESC no pudo arrancar el motor.</b>	“BB, BBB, BBBB” (Estos tonos suenan circularmente)	La dirección “Normal / Reversa” del canal del acelerador en el transmisor es incorrecta.	Consultar las instrucciones del transmisor y configurar correctamente la dirección “Normal / Reversa” del canal del acelerador.

*Nota:* Esta tabla muestra los problemas que puede presentar el ESC AIR20A y la solución para cada una de las posibles causas, establecidas por su fabricante. Recuperado de (Robotshop, 2020).

Si persisten los problemas aún después de realizar el troubleshooting es recomendable revisar que las conexiones eléctricas de los componentes no estén en cortocircuito, desconectadas o averiadas. Esta acción se la puede realizar visualmente o con la ayuda de un multímetro.

De ser el caso que los fallos continúen, se debe considerar que algún componente está dañado. Para lo cual hay que desmontar el sistema y verificar cada uno de los accesorios utilizando un multímetro o una fuente de alimentación, hasta encontrar el componente dañado. Y la solución más recomendable para esta situación es reemplazarlo por uno nuevo.

### 3.6. Análisis de resultados

Una vez que los sistemas de propulsión y de control han sido ensamblados sobre la estructura del cuadricóptero T4 y calibrados según las especificaciones del fabricante de los componentes se procedió a realizar los análisis de resultados, lo cual incluye pruebas de funcionamiento del drone en tierra y en vuelo.

#### 3.6.1. Pruebas funcionales

Las pruebas funcionales del cuadricóptero T4 consisten en el correcto funcionamiento de todos los sistemas y subsistemas al momento de encenderlos, esto cuando el drone se encuentra en tierra. Para ello previamente se verificó que todos los componentes se encuentren bien conectados y totalmente asegurados sobre la estructura, posterior a eso se procedió a encender el drone y comprobar que cada elemento funcione correctamente dentro de los parámetros normales.

**Tabla 10**

*Análisis de prueba funcional*

PARÁMETRO	MODO DE VERIFICACIÓN
Batería del drone	11.1 V en el cargador
Batería del radiocontrol	6 V (4 pilas AA)
Controlador de vuelo	Luces encendidas
Buzzer	Pitido
Motores	Palpitación de cada motor
Receptor	Luz encendida
Conexión emisor-receptor	Cantidad de batería TX <sup>5</sup> y RX <sup>6</sup> en pantalla del radiocontrol

*Nota:* Esta tabla muestra el modo en que visualmente el operador puede verificar que cada parámetro del drone cuadricóptero T4 se encuentra funcionando.

<sup>5</sup> TX: Transmisor

<sup>6</sup> RX: Receptor

La batería cumple un rol muy importante en esta prueba funcional ya que es la encargada de energizar todos los sistemas montados sobre la estructura del drone, por ello al momento de encender el aparato se apreció que todos los componentes entraron en funcionamiento, con lo cual se verificó que la batería está totalmente operable.

Posterior a eso se comprobó el encendido del controlador de vuelo Pixhawk 4, buzzer, motores y conexión emisor-receptor, obteniendo un resultado favorable en todos estos componentes.

Finalmente se realizó la verificación de funcionamiento con el radiocontrol, el cual mantuvo una conexión constante entre emisor y receptor, comprobando que las órdenes de aceleración y movimiento emitidas desde los mandos se veían reflejadas en el movimiento de los motores.

**Figura 91**

*Prueba funcional del drone*



*Nota:* En la imagen se observa las luces led encendidas lo que indica que el controlador de vuelo está funcionando.

**Figura 92**

*Prueba funcional del radiocontrol*



*Nota:* En la imagen se observa la conexión emisor-receptor en la pantalla del radiocontrol.

### 3.6.2. Pruebas operacionales

Las pruebas operacionales del cuadricóptero T4 consisten en la correcta operación de todos los sistemas y subsistemas cuando el drone se encuentra en vuelo. Previo a empezar con esta prueba se realizó un chequeo general de todos los componentes para verificar que se encuentren funcionando correctamente y al no detectarse ningún fallo se procedió a realizar el vuelo. Ver el ANEXO A para la operación del cuadricóptero T4 con el radiocontrol.

Es indispensable colocar el drone sobre una superficie plana y despejada, observando que en su eje vertical no exista ningún obstáculo como por ejemplo cables eléctricos, mantener al personal a una distancia mínima de 3 metros a la redonda del cuadricóptero y el operario deberá avisar que el drone va a entrar en operación para evitar posibles accidentes. En las siguientes tablas se muestran los resultados y la descripción de las 2 pruebas operacionales que se realizaron.

Tabla 11

## Análisis de prueba operacional número 1

DATOS FUNDAMENTALES			
<b>Número de prueba:</b> 01			
<b>Fecha:</b> 12/diciembre/2019	<b>Lugar:</b> Latacunga	<b>Hora:</b> 15:34	
<b>Temperatura:</b> 16°C	<b>Presencia de viento:</b> No	<b>Presencia de precipitaciones:</b> No	
PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO			
<b>Batería del drone:</b>	11.1 V	<b>Batería del radiocontrol:</b>	5.45 V
<b>Buzzer:</b>	Pitido	<b>Controlador de vuelo:</b>	Luces encendidas
<b>Receptor:</b>	Luz encendida	<b>Motores:</b>	Palpitación en 4 motores
<b>Conexión emisor-receptor:</b>	TX y RX en pantalla		
RESULTADOS PRUEBA OPERACIONAL			
<b>Tiempo de vuelo:</b>	8 minutos	<b>Altura de vuelo aprox:</b>	2 metros
<b>Batería del drone:</b>	9.2 V	<b>Batería del radiocontrol:</b>	5.3 V
<b>Distancia línea de vista aprox:</b>	5 metros		
<b>Movimiento altura:</b>	Normal	<b>Movimiento yaw:</b>	No normal
<b>Movimiento roll:</b>	Normal	<b>Movimiento pitch:</b>	Normal
<b>Daños estructurales:</b>	No	<b>Cables desconectados:</b>	No
<b>Daños en motores:</b>	No	<b>Daños en hélices:</b>	No
<b>Sobrecalentamiento de motores:</b>	No		
<b>NOVEDADES:</b>	Ligera rotación hacia la derecha en el eje vertical (movimiento yaw) durante el vuelo estacionario.		
VISTO BUENO DE LA PRUEBA OPERACIONAL			
	Si:		No: X

*Nota:* Esta tabla muestra los datos y parámetros analizados en la primera prueba operacional del cuadricóptero T4, y los resultados obtenidos que sirven de sustento para calificar el visto bueno de dicha prueba.

La primera prueba operacional se llevó a cabo el día 12 de diciembre del año 2019 en la ciudad de Latacunga a las 15 horas con 34 minutos, con una temperatura ambiente de 16°C, sin presencia de viento ni precipitaciones. Al momento del encendido del drone no se presentó ninguna novedad que impidiera el despegue del mismo, posterior a esto se realizó una ascenso vertical lento y controlado empujando suavemente el stick acelerador del radiocontrol.

A una altura de vuelo aproximada de 2 metros se procedió a realizar la prueba de movimientos principales del drone con el radiocontrol, obteniendo resultados eficaces con los movimientos roll (balanceo) y pitch (cabeceo). Pero se constató un ligero descontrol con el movimiento yaw (guiñada), así transcurridos 8 minutos volando la aeronave se realizó un aterrizaje seguro y se inspeccionó visualmente toda la estructura y componentes, sin obtener ninguna otra novedad.

Finalmente para solucionar el problema relacionado con el movimiento yaw, únicamente se debe recalibrar los motores en el software de la controladora de vuelo Pixhawk para que las revoluciones de cada motor sean estables y acordes al movimiento de guiñada del cuadricóptero.

### **Figura 93**

#### *Prueba operacional número 1*



*Nota:* En la imagen se observa la primera prueba de vuelo del cuadricóptero T4.

Tabla 12

## Análisis de prueba operacional número 2

DATOS FUNDAMENTALES			
<b>Número de prueba:</b> 02			
<b>Fecha:</b> 10/enero/2020	<b>Lugar:</b> Latacunga	<b>Hora:</b> 10:20	
<b>Temperatura:</b> 18°C	<b>Presencia de viento:</b> No	<b>Presencia de precipitaciones:</b> No	
PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO			
<b>Batería del dron:</b>	11.4 V	<b>Batería del radiocontrol:</b>	5.2 V
<b>Buzzer:</b>	Pitido	<b>Controlador de vuelo:</b>	Luces encendidas
<b>Receptor:</b>	Luz encendida	<b>Motores:</b>	Palpitación en 4 motores
<b>Conexión emisor-receptor:</b>	TX y RX en pantalla		
RESULTADOS PRUEBA OPERACIONAL			
<b>Tiempo de vuelo:</b>	15 minutos	<b>Altura de vuelo aprox:</b>	10 metros
<b>Batería del dron:</b>	7.3 V	<b>Batería del radiocontrol:</b>	4.8 V
<b>Distancia línea de vista aprox:</b>	15 metros		
<b>Movimiento altura:</b>	Normal	<b>Movimiento yaw:</b>	Normal
<b>Movimiento roll:</b>	Normal	<b>Movimiento pitch:</b>	Normal
<b>Daños estructurales:</b>	No	<b>Cables desconectados:</b>	No
<b>Daños en motores:</b>	No	<b>Daños en hélices:</b>	No
<b>Sobrecalentamiento de motores:</b>	No		
<b>NOVEDADES:</b>	Ninguna		
VISTO BUENO DE LA PRUEBA OPERACIONAL			
Si: X		No:	

*Nota:* Esta tabla muestra los datos y parámetros analizados en la segunda prueba operacional del cuadricóptero T4, y los resultados obtenidos que sirven de sustento para calificar el visto bueno de dicha prueba.

La segunda prueba operacional se llevó a cabo el día 10 de enero del año 2020 en la ciudad de Latacunga a las 10 horas con 20 minutos, con una temperatura ambiente de 18°C, sin presencia de viento ni precipitaciones. Durante el encendido, despegue, maniobrabilidad y aterrizaje del drone no se presentó ningún inconveniente, observando así que los motores respondían de manera eficaz y correcta a las órdenes que el operador emitía desde el radiocontrol, en ningún momento se vio interrumpida la señal de radiofrecuencia ni tampoco se constató pérdidas de empuje o movimientos descontrolados.

Por tanto, después de 15 minutos de duración del vuelo y alcanzada una altura aproximada de 10 metros, la prueba operacional realizada tiene un visto bueno positivo, lo que garantiza que los sistemas de propulsión y de control se encuentran totalmente funcionales y operacionales.

### **Figura 94**

*Prueba operacional número 2*



*Nota:* En la imagen se observa la segunda prueba de vuelo del cuadricóptero T4.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- En base a la recopilación de información técnica referente a los sistemas de propulsión que se usan en los drones, se pudo conocer los principios básicos de funcionamiento que estos poseen, como es la generación de una fuerza de sustentación superior al peso de la aeronave obtenida gracias al giro de motores eléctricos y hélices.
- Se realizó la selección de componentes que integran el sistema de propulsión, los cuales fueron 4 motores AIR2213 de 920KV, 4 hélices T9545, 4 ESC AIR20A, un módulo de energía PDB-XT60 y una batería LiPo Turnigy de 5000 mAh. Resultando acordes a las prestaciones técnicas necesarias del drone.
- De acuerdo a las especificaciones técnicas del cuadricóptero T4, se ensambló un sistema de propulsión con un diseño adecuado y óptimo para la controladora de vuelo Pixhawk PX4, que garantiza su eficaz funcionamiento y desempeño.
- Mediante las pruebas funcionales y operacionales, se analizó el desempeño del sistema de propulsión, el cual le permite al drone realizar un vuelo seguro hasta una altura aproximada de 200 metros por un tiempo estimado de 20 minutos.

## 4.2. Recomendaciones

- Es recomendable visitar la página web Thingiverse, ya que en ella se encuentran las especificaciones técnicas que debe poseer un cuadricóptero T4.
- Para la selección de los motores siempre se debe considerar que la sumatoria del empuje del número de motores que se utilice sea mayor al peso total del dron.
- Evitar tocar los pines o conectores de los componentes con las manos descubiertas, ya que la electricidad estática del cuerpo humano puede ocasionar un cortocircuito.
- Durante las pruebas de funcionamiento en tierra se deben retirar las hélices de los motores para evitar que el giro involuntario de estas ocasionen posibles accidentes.

## GLOSARIO

### A

**Acelerador:** Mecanismo destinado a acelerar el funcionamiento de otro.

**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.

**Aeronavegabilidad:** Aptitud técnica y legal que deberá tener una aeronave para volar en condiciones de operación segura.

### B

**Buzzer:** También conocido como zumbador, es un pequeño transductor capaz de convertir la energía eléctrica en sonido.

### C

**Calibración:** Acción de ajustar un instrumento o equipo respecto a una referencia.

**Celda:** Es una batería en su forma más simple que consiste en un ánodo y un cátodo, que se encuentran separados por un electrodo.

**Corriente:** Magnitud física que expresa la cantidad de electricidad que fluye por un conductor en la unidad de tiempo, y cuya unidad en el sistema internacional es el amperio.

**Cortocircuito:** Aumento brusco de intensidad en la corriente eléctrica de una instalación por la unión directa de dos conductores de distinta fase.

**D**

**Drone:** Pequeño vehículo aéreo no tripulado, utilizado en el ámbito militar (para reconocimiento táctico desde gran altura, vigilancia del campo de batalla o guerra electrónica) y civil (entretenimiento, grabación de imágenes, vigilancia, etc).

**E**

**Eje:** Recta alrededor de la cual gira, o se supone que gira, un cuerpo dotado de un movimiento, real o aparente, de rotación.

**Electricidad estática:** Electricidad que aparece en un cuerpo cuando existen en él cargas eléctricas en reposo.

**Empuje:** Fuerza propulsora desarrollada por un motor de reacción.

**Ensamblaje:** Unión de varios elementos, de manera que ajusten entre sí perfectamente, normalmente haciendo que parte de uno entre en otro.

**Estaño:** Metal plateado, maleable, que no se oxida fácilmente y es resistente a la corrosión. Se utiliza para soldar circuitos eléctricos.

**Estator:** En las dinamos y motores eléctricos, circuito fijo dentro del cual gira el móvil o rotor.

**F**

**Fuerza:** Causa capaz de modificar el estado de reposo o de movimiento de un cuerpo, o de deformarlo.

## H

**Hélice:** Dispositivo impulsor de una aeronave que posee palas sobre un eje impulsado por un motor que cuando rota produce por su acción en el aire un empuje aproximadamente perpendicular a su plano de rotación y el cual incluye componentes de control normalmente suministrados por el fabricante, pero no incluye los rotores principales y auxiliares o planos aerodinámicos giratorios del motor.

## M

**Maniobrabilidad:** Velocidad con la que un vehículo puede cambiar de dirección sin que se pierda el control.

**Mantenimiento:** Trabajos requeridos para asegurar el mantenimiento de la aeronavegabilidad de las aeronaves, lo que incluye una o varias de las siguientes tareas: reacondicionamiento, reparación, inspección, reemplazo de piezas, modificación o rectificación de defectos.

**Motor:** Máquina destinada a producir movimiento a expensas de otra fuente de energía.

**Multímetro:** Es un instrumento eléctrico portátil para medir directamente magnitudes eléctricas activas, como corrientes y potenciales (tensiones), o pasivas, como resistencias, capacidades y otras.

## P

**Palpitación:** Movimiento involuntario, rápido y repetitivo que se puede observar en los motores de un drone al momento de encenderlo.

**Parámetro:** Variable que, en una familia de elementos, sirve para identificar cada uno de ellos mediante su valor numérico.

**Potencia:** Cantidad de energía producida o consumida por unidad de tiempo.

**Programación:** Preparación de una máquina para que cumpla con una cierta tarea en un momento determinado.

**Propulsión:** Procedimiento empleado para que una aeronave avance en el espacio, por efecto de la reacción producida por la descarga de un fluido que es expulsado a gran velocidad por la parte posterior.

## R

**Resistencia:** Dificultad que opone un circuito al paso de una corriente.

**Revolución:** Vuelta completa que da un cuerpo alrededor de su eje.

**Rotor:** Pieza de una máquina electromagnética o de una turbina que gira dentro de un elemento fijo.

## S

**Sincronización:** Propiciar que dos fenómenos o acciones resulten coincidentes en el tiempo o se organicen según un determinado orden.

**Sobretensión:** Es un aumento por encima de los valores establecidos como máximos, de la tensión eléctrica entre dos puntos de un circuito o instalación eléctrica.

**Stick:** Pequeña palanca de un radiocontrol que puede moverse en varias direcciones.

**Sustentación:** Fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la dirección de la corriente incidente.

### T

**Temperatura:** Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K).

### V

**Voltaje:** Cantidad de voltios que actúan en un aparato o sistema eléctrico.

**Vuelo:** Trayecto que recorre una aeronave, haciendo o no escalas, entre el punto de origen y el de destino.

## ABREVIATURAS

**BEC:** Battery Eliminating Circuit

**CW:** Clockwise

**CWW:** Counter clockwise

**DGAC:** Dirección General de Aviación Civil del Ecuador

**ESC:** Electronic Speed Controller

**FPV:** First Person View

**GPS:** Global Position System

**OACI:** Organización de Aviación Civil Internacional

**PDB:** Power Distribution Board

**RPA:** Aeronave Pilotada Remotamente

**RPAS:** Sistema de la Aeronave Pilotada Remotamente

**RPM:** Revoluciones por minuto

**UAS:** Unmanned Aerial System

**UAV:** Unmanned Aerial Vehicle

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrodrones. (2017). *Modelos de drones fumigadores*. Obtenido de <https://agrodrones.wordpress.com/2017/08/07/siete-modelos-de-drones-fumigadores-que-debes-conocer/>
- Aliexpress. (2019). *Batería de Li-Ion*. Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/32820976237.html>
- Aliexpress. (2019). *Predator Drone*. Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/32599898940.html>
- Anderson, C. (2014). *DIY DRONES*. Recuperado el 15 de julio de 2019, de <https://diydrones.com/forum/topics/3d-printed-t4-and-t6>
- Banggood. (2019). *RC Quadcopter RTF*. Obtenido de [https://es.banggood.com/Eachine-H8-Mini-Headless-Mode-2\\_4G-4CH-6-Axis-RC-Quadcopter-RTF-p-975808.html?ID=22442482&cur\\_warehouse=CN](https://es.banggood.com/Eachine-H8-Mini-Headless-Mode-2_4G-4CH-6-Axis-RC-Quadcopter-RTF-p-975808.html?ID=22442482&cur_warehouse=CN)
- Banggood. (2019). *T - motor mn2213 950kv*. Recuperado el 5 de enero de 2020, de [https://es.banggood.com/T-Motor-MN2213-950KV-Brushless-Motor-T9545-Self-locking-Propeller-Power-Combo-4-Motors-4-Props-p-1081961.html?cur\\_warehouse=CN](https://es.banggood.com/T-Motor-MN2213-950KV-Brushless-Motor-T9545-Self-locking-Propeller-Power-Combo-4-Motors-4-Props-p-1081961.html?cur_warehouse=CN)
- Betancourt Vera, G. (2016). *Planeación de trayectorias mediante esquemas basados en control predictivo: caso de estudio de un cuadrirotor*. Cuernavaca: Tecnológico Nacional de México. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/306275351\\_Planeacion\\_de\\_Trayectorias\\_Mediante\\_Esquemas\\_Basados\\_en\\_Control\\_Predictivo\\_Caso\\_de\\_Estudio\\_de\\_un\\_Cuadrirotor#pf1f](https://www.researchgate.net/publication/306275351_Planeacion_de_Trayectorias_Mediante_Esquemas_Basados_en_Control_Predictivo_Caso_de_Estudio_de_un_Cuadrirotor#pf1f)
- Brendan22. (2014). *Thingiverse*. Obtenido de <https://www.thingiverse.com/thing:261145>
- Byod. (2019). *880KV MOTOR AC2836-358*. Obtenido de <https://www.buildyourowndrone.co.uk/880kv-motor-ac2836-358>
- Comorecuperar. (2017). *Baterías lipo*. Obtenido de <https://comorecuperar.org/una-bateria/>

- Comprardronesonline. (2018). *¿Cómo funcionan las hélices de un drone?* Obtenido de <https://www.comprardrones.online/como-funcionan-las-helices-de-un-drone/>
- Dekasto. (2019). *T-Motor Air 2213 920KV Brushless Motor*. Recuperado el 4 de enero de 2020, de <http://dekasto.com/catalog/view/364>
- Delgado Hernando, V. (2016). *ElDrone*. Recuperado el 6 de junio de 2019, de <http://eldrone.es/que-es-un-drone/>
- DGAC. (2015). *Resolución No 251/2015*. Quito. Recuperado el 15 de julio de 2019, de [https://www.eluniverso.com/sites/default/files/archivos/2015/09/la\\_dac\\_regula\\_el\\_uso\\_de\\_drones\\_en\\_ecuador.pdf](https://www.eluniverso.com/sites/default/files/archivos/2015/09/la_dac_regula_el_uso_de_drones_en_ecuador.pdf)
- Dhgate. (2019). *Drone con cámara*. Obtenido de <https://es.dhgate.com/product/drone-with-camera-drone-hd-wide-angle-200w/420337242.html>
- Díaz, R. (2014). *MuyDrones*. Recuperado el 15 de julio de 2019, de <https://www.muydrones.com/que-es-un-cuadricoptero/>
- Domínguez, J. (2018). *20minutos*. Obtenido de <https://www.20minutos.es/noticia/2725142/0/licencia/piloto/drones/>
- Donweb. (2014). *Agencia de Noticias Tecnológicas*. Recuperado el 6 de junio de 2019, de <http://agencia.donweb.com/los-14-usos-de-drones-que-seguro-no-conocias/>
- Dronesbaratosya. (2019). *Drones con cámara*. Obtenido de <https://www.dronesbaratosya.com/>
- Dronesconcamara. (2019). *Drones de juguete*. Obtenido de <https://dronesconcamara.top/juguete/>
- Droning. (2014). *¿Que partes componen un drone multirrotor?* Obtenido de <https://droningpage.wordpress.com/2014/10/19/que-partes-componen-un-drone-multirrotor/>
- Electronicarc. (2019). *Batería de Li-Po*. Obtenido de <http://electronicarc.com/catalogo/lipo-b6sb-8000-mah-b30cb-p-760.html>
- Etigowni, S. (2018). *Researchgate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Drones-pitch-roll-and-yaw\\_fig2\\_329521700](https://www.researchgate.net/figure/Drones-pitch-roll-and-yaw_fig2_329521700)
- Fpvmania. (2017). *Open Nacional F3U*. Obtenido de <https://fpvmania.es/evento/open-nacional-f3u-valencia-2018/>

- FPVMAX. (2017). *Variador electrónico*. Obtenido de <http://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-funciona/>
- Ganchozo García, R. E. (2019). *Implementación de un dron para la recolección de datos en levantamiento topográfico para la carrera de ingeniería forestal*. Jipijapa: Universidad Estatal del Sur de Manabí. Obtenido de <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/1574/1/UNESUM-ECU-REDES-2019-20.pdf>
- García Mateu, L. (2016). *Drones, el cielo está al alcance de todos*. IES Emperador Carles. Recuperado el 9 de junio de 2019, de [https://www.edubcn.cat/rcs\\_gene/treballs\\_recerca/2015-2016-03-1-TR.pdf](https://www.edubcn.cat/rcs_gene/treballs_recerca/2015-2016-03-1-TR.pdf)
- Hélicéo. (2019). *Fox4 profesional dron multirotor*. Obtenido de <http://www.heliceo.com/es/produits-pour-geometres/fox4-dron-multirotor/>
- Hobbyking. (2019). *MT2213-935KV MultiStar motor*. Obtenido de [https://hobbyking.com/es\\_es/mt2213-935kv-multistar-motor-and-propeller-combo-10x4-5-cw-ccw.html?\\_\\_store=es\\_es](https://hobbyking.com/es_es/mt2213-935kv-multistar-motor-and-propeller-combo-10x4-5-cw-ccw.html?__store=es_es)
- Induambiente. (2019). *Los Drones Verdes*. Obtenido de <https://www.induambiente.com/destacamos/los-drones-verdes>
- Jbebopforum. (2015). *El Skycontroller*. Obtenido de <https://jbebopforum.wordpress.com/2015/02/21/el-skycontroller/>
- Llamas, L. (2016). *Tipos de motores rotativos para proyectos de arduino*. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/tipos-motores-rotativos-proyectos-arduino/>
- Mediatrends. (2016). *¿Cómo funciona el simulador de drones?* Obtenido de <https://www.mediatrends.es/a/100088/simulador-pilotar-drones/>
- Mercadolibre. (2019). *Drones y Accesorios*. Obtenido de [https://electronica.mercadolibre.com.ar/drones-accesorios-repuestos-otros/#redirectedFromVip=https%3A%2F%2Farticulo.mercadolibre.com.ar%2FMLA-731573387-combo-4-motores-2212-920-kv-\\_JM](https://electronica.mercadolibre.com.ar/drones-accesorios-repuestos-otros/#redirectedFromVip=https%3A%2F%2Farticulo.mercadolibre.com.ar%2FMLA-731573387-combo-4-motores-2212-920-kv-_JM)
- Mobus. (2019). *ESC para drones*. Obtenido de <https://mobus.es/blog/esc-para-drones-para-que-sirven/>
- Molina Moscoso, T. O. (2017). *Reglamento que regule el Registro, Certificación, Control y Operación del Sistema de Aeronaves no Tripuladas (RPAS – Drones)*. Quito:

- Universidad Central del Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14517>
- Moyano Díaz, S. (2014). *Diseño y Construcción de un Quadcopter*. Recuperado el 15 de julio de 2019, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21902/102664.pdf>
- Osorio, A. (2019). *Publimetro*. Obtenido de <https://www.publimetro.cl/cl/noticias/2020/01/03/mq-9-reaper-predator-b-asi-dron-militar-mas-letal-acabo-general-soleimani.html>
- Prometec. (2019). *Lo que hay que saber para elegir los motores para un cuadricóptero*. Obtenido de <https://www.prometec.net/elegir-motores-cuadrapter/>
- Rcinnovations. (2019). *Batería FrSky Taranis X9E 2000mAh 9.6v*. Obtenido de <https://rc-innovations.es/bateria-frsky-taranis-x9E-2000mah-9.6v>
- Robotshop. (2020). *User manual air 20a*. Recuperado el 15 de enero de 2020, de <https://www.robotshop.com/media/files/pdf/user-manual-air-20a.pdf>
- Tdrobótica. (2020). *Turnigy LiPo 5000mAh*. Recuperado el 3 de enero de 2020, de <http://tdrobotica.co/turnigy-lipo-5000mah-111v-25c-35c/1107.html>
- Tecnidrones. (2019). *Los drones, una revolucionaria herramienta para bomberos y policías*. Obtenido de <https://www.tecnidrones.com/2019/10/en-video-los-drones-una-revolucionaria-herramienta-para-bomberos-y-policias>
- Telesa. (2019). *Batería de Níquel Cadmio*. Obtenido de <http://telesaonline.com/componentes-electronicos/componentes-electronicos-pilas-portapilas-y-baterias/componentes-electronicos-pilas-portapilas-y-baterias-baterias/pack-de-baterias-6v-1000mah-ni-cd-5xaa-r6-saft-con-conector>
- Tutorialdedrones. (2019). *Motor para Drone*. Obtenido de <https://www.tutorialdedrones.com/motor-para-drone/>
- Vergara, R., Hernández, A., Virués, D., Bernardo, S., García, J., & Ramos, D. (2016). *Piloto de dron (RPAS)* (Segunda ed.). Madrid: Ediciones Paraninfo S.A. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=ERCKCwAAQBAJ&pg=PA312&dq=que+s+on+los+drones&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj2tL6UnKLiAhVtoFkKHV3VDPwQ6AEIOzAE#v=onepage&q&f=true>

Villalta Ayala, M., & Guerra Jara, G. (2016). *Sistema de diseño de drones*. Universidad del Azuay. Recuperado el 21 de junio de 2019, de <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6016>

Wikipedia. (2019). *Northrop Grumman MQ-8 Fire Scout*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Northrop\\_Grumman\\_MQ-8\\_Fire\\_Scout](https://es.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_MQ-8_Fire_Scout)

Wikipedia. (2019). *Rotor de cola*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor\\_de\\_cola](https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_de_cola)

# ANEXOS

**ANEXO A:** Manual de operación del cuadricóptero T4

**ANEXO B:** Manual de mantenimiento del cuadricóptero T4

**ANEXO C:** Manual de seguridad del cuadricóptero T4

**ANEXO D:** Manual de usuario ESC AIR20A