



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**Diseño y Simulación de un Prototipo de Dron Fumigador con Capacidad de Ocho  
Litros para Cultivo de Frutilla**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingenieros en Mecatrónica

**AUTORES: WILMER JHONNATHAN ESCOBAR AUMALA**

**JHON HENRY VALLEJO SOLIZ**

**TUTOR: FABIO EDUARDO OBANDO HERRERA**

Quito-Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Nosotros, Wilmer Jhonnathan Escobar Aumala con documento de identificación N° 1726831090 y Jhon Henry Vallejo Soliz con documento de identificación N° 1725491300; manifestamos que: Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que, sin fines de lucro, la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 13 de septiembre del año 2023

Atentamente,

Wilmer Jhonnathan Escobar Aumala

1726831090

Jhon Henry Vallejo Soliz

1725491300

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Wilmer Jhonnathan Escobar Aumala con documento de identificación N° 1726831090 y Jhon Henry Vallejo Soliz con documento de identificación N° 1725491300, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores de la *Propuesta Tecnológica*: “Diseño y Simulación de un Prototipo de Dron Fumigador con Capacidad de Ocho Litros para Cultivo de Frutilla”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de septiembre del año 2023

Atentamente,

Wilmer Jhonnathan Escobar Aumala

1726831090

Jhon Henry Vallejo Soliz

1725491300

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fabio Eduardo Obando Herrera, con documento de identificación N° 1707982169, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE DRON FUMIGADOR CON CAPACIDAD DE OCHO LITROS PARA CULTIVO DE FRUTILLA, realizado por Wilmer Jhonnathan Escobar Aumala con documento de identificación N° 1726831090 y Jhon Henry Vallejo Soliz con documento de identificación N° 1725491300, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de *Propuesta Tecnológica* que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 13 de septiembre del año 2023

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Fabio', is written over a faint, light blue circular stamp. The signature is positioned above a solid horizontal line.

Ing. Fabio Eduardo Obando Herrera, MSc

1707982169

## **Agradecimiento**

Doy gracias a Dios por otorgarme salud y sabiduría para llevar a cabo este proyecto, quiero expresar mi gratitud a mis padres, hermanas y tíos, quienes han sido un apoyo fundamental tanto en el aspecto motivacional como en el aspecto económico de mis estudios. Asimismo, quiero extender mis más sinceros agradecimientos a toda el área de docentes de la carrera de Mecatrónica, quienes han sido guías en mi desarrollo académico, brindándome valiosas enseñanzas, orientación y su amistad a lo largo de mi proceso de formación. Agradezco a mis amigos por su apoyo incondicional durante los desafíos académicos y por los inolvidables momentos compartidos. Les doy las gracias de todo corazón.

## Índice

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	III
JUSTIFICACIÓN .....	IV
OBJETIVOS .....	IV
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 La agricultura en el Ecuador.....	5
1.2 Importancia de la fumigación en los cultivos de frutilla .....	5
1.3 Las plagas más relevantes en el cultivo de frutilla .....	5
1.3.1 Gusanos cortadores.....	5
1.3.2 Cutzo.....	6
1.3.3 Áfidos o Pulgón de la frutilla .....	6
1.3.4 Ácaros o Arañita Bimaculada.....	6
1.3.5 Trips.....	6
1.3.6 Gastrópodos .....	6
1.4 Enfermedades más relevantes en el cultivo de frutilla .....	6
1.4.1 Botrytis .....	6
1.4.2 Antracnosis .....	7
1.4.3 Oídio .....	7
1.4.4 Pudrición roja .....	7
1.4.5 Verticilosis.....	7
1.5 Sustancias químicas y biológicas para el cuidado y tratamiento de la frutilla .....	7

1.5.1 Métodos de control de plagas .....	8
1.6 Situación de los agroquímicos en Ecuador .....	9
1.7 Consecuencias de los pesticidas en la salud .....	9
1.8 Optimización de los procesos en la fumigación .....	9
1.9 Uso del dron.....	9
1.9.1 Configuración del dron para la agricultura.....	10
1.9.2 Aplicaciones en el sector agrícola .....	10
1.10 Comportamiento de vuelo.....	11
1.11 Componentes esenciales de un dron fumigador .....	11
1.12 Sistema de propulsión eléctrico .....	12
1.13 Sistema de alimentación del dron.....	14
1.14 Sistema de sensores y actuadores .....	15
1.15 Sistema de fumigación.....	16
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	17
2.1 Identificación de las necesidades .....	17
2.2 Análisis del tipo de dron.....	17
2.3 Análisis cuantitativo.....	19
2.4 Estudio de mercado .....	19
2.5 Análisis cuantitativo del dron comercial.....	22
2.6 Selección de los materiales .....	23
2.7 Selección del controlador.....	24
2.8 Selección de la bomba para fumigación.....	26

CAPÍTULO 3: DISEÑO .....	28
3.1 Requerimientos del cuadricóptero fumigador .....	28
3.2 Variables dependientes e independientes .....	28
3.2.1 Funciones del diseño .....	29
3.3 Diseño del dron seleccionado.....	30
3.4 Componentes del dron fumigador .....	30
3.5 Componentes de pulverización y radar seleccionado .....	31
3.6 Cálculos para el diseño.....	31
3.7 Motor seleccionado .....	33
3.8 Hélices.....	33
3.9 Controlador de velocidad .....	34
3.10 Batería .....	35
3.11 Diseño de brazos .....	36
3.12 Momento flector.....	37
3.13 Cálculo del brazo.....	38
3.14 Análisis estático.....	38
3.15 Tensiones Von mises de la estructura .....	42
3.16 Desplazamiento estático estructura .....	43
3.17 Deformaciones unitarias en la estructura .....	44
3.18 Factor de seguridad de la estructura.....	44
3.19 Cálculo del empuje mínimo para los motores a la densidad del aire de Quito .....	44
3.20 Cálculo de Velocidad (Horizontal/Vertical) .....	46
3.21 Tiempo de vuelo y distancia recorrida .....	47
3.22 Cálculo de corriente, potencia y duración del ESC.....	48
3.23 Cálculo del sistema de pulverización .....	49

CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	51
4.1 Dron diseñado en solidworks .....	51
4.2 Simulación del análisis aerodinámico .....	52
4.3 Simulación en clima cálido y templado .....	54
4.4 Simulación en la fumigación de cultivos de frutilla.....	57
4.5 Delimitaciones del terreno para la partida de vuelo.....	58
4.6 Simulación de vuelo del dron mediante el software Coppelia Sim Edu .....	60
4.6.1 Exportación del dron al software Coppelia Sim.....	61
4.6.2 Delimitación de la ruta del dron .....	62
4.6.3 Resultados obtenidos por la simulación .....	63
4.7 Simulación del control del sistema de fumigación.....	67
4.8 Análisis de costos .....	69
CONCLUSIONES .....	70
RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS.....	72
ANEXOS .....	75

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Variador de velocidad ESC .....	13
<b>Figura 2.</b> Motor eléctrico Brushless.....	13
<b>Figura 3.</b> Batería de lipo .....	14
<b>Figura 4.</b> Sistemas de referencia de la aeronave .....	15
<b>Figura 5.</b> Acelerómetro y giroscopio .....	15
<b>Figura 6.</b> Barómetro integrado.....	16
<b>Figura 7.</b> Cultivos de frutilla a campo abierto .....	17
<b>Figura 8.</b> Boceto de un dron fumigador con ocho hélices .....	18
<b>Figura 9.</b> Boceto de un dron fumigador con seis hélices .....	18
<b>Figura 10.</b> Boceto de un dron fumigador con cuatro hélices.....	18
<b>Figura 11.</b> Dron HGS T10 .....	20
<b>Figura 12.</b> Dron M4E.....	20
<b>Figura 13.</b> Dron DJI AGRAS T10 .....	21
<b>Figura 14.</b> Dron XAG P30 .....	22
<b>Figura 15.</b> Primer material UHM obtenido por el software.....	24
<b>Figura 16.</b> Segundo material 6061-T6 obtenido por el software .....	24
<b>Figura 17.</b> Controlador Pixhawk cube .....	26
<b>Figura 18.</b> Micro Bomba Anselft.....	27
<b>Figura 19.</b> Panel de funciones del dron.....	29
<b>Figura 20.</b> Esquema del sistema .....	29
<b>Figura 21.</b> Configuración dron cuadricóptero.....	30
<b>Figura 22.</b> Motor P 80 KV 120 .....	33
<b>Figura 23.</b> Hélices MF2815R.....	34
<b>Figura 24.</b> ESC DE 100 A 6S .....	35
<b>Figura 25.</b> Batería Diamond Foxtech 16 Ah 6S.....	36
<b>Figura 26.</b> Croquis preliminar del dron .....	36
<b>Figura 27.</b> Diagrama de cuerpo libre del brazo.....	37
<b>Figura 28.</b> Resultados determinados por el MD SOLIDS .....	37
<b>Figura 29.</b> Análisis nodal de tensiones Von Mises en el soporte .....	39
<b>Figura 30.</b> Desplazamiento estático del soporte .....	40

<b>Figura 31.</b> Deformación del soporte .....	40
<b>Figura 32.</b> FDS del soporte .....	41
<b>Figura 33.</b> Análisis nodal Von Mises.....	41
<b>Figura 34.</b> Desplazamiento estático del brazo .....	41
<b>Figura 35.</b> Deformación unitaria del brazo .....	42
<b>Figura 36.</b> FDS del brazo.....	42
<b>Figura 37.</b> Análisis nodal de tensiones Von Mises estructura .....	43
<b>Figura 38.</b> Desplazamiento estático de la estructura.....	43
<b>Figura 39.</b> Deformación de la estructura .....	44
<b>Figura 40.</b> Factor de seguridad estructura.....	44
<b>Figura 41.</b> Dron cuadricóptero.....	51
<b>Figura 42.</b> Tanque de ocho litros .....	51
<b>Figura 43.</b> Análisis presión del aire .....	52
<b>Figura 44.</b> Simulación aerodinámica de la presión en el cuadricóptero .....	52
<b>Figura 45.</b> Simulación de la rotación de las hélices.....	53
<b>Figura 46.</b> Simulación de la temperatura de trabajo en el dron. ....	53
<b>Figura 47.</b> Simulación de la velocidad del viento en las hélices .....	54
<b>Figura 48.</b> Parámetros ingresados en el software .....	55
<b>Figura 49.</b> Resultados obtenidos de los componentes internos del dron .....	55
<b>Figura 50.</b> Resultados obtenidos de la motorización del dron.....	56
<b>Figura 51.</b> Gráfica del alcance vs velocidad .....	56
<b>Figura 52.</b> Gráfica del análisis del motor.....	57
<b>Figura 53.</b> Área de fumigación .....	58
<b>Figura 54.</b> Configuración de los parámetros del terreno .....	59
<b>Figura 55.</b> Simulación del proceso de fumigación .....	60
<b>Figura 56.</b> Modelo 3D del dron exportado .....	61
<b>Figura 57.</b> Jerarquía de las partes del dron con su configuración.....	62
<b>Figura 58.</b> Ruta de vuelo establecida para el dron.....	62
<b>Figura 59.</b> Simulación del vuelo del dron en la ruta establecida .....	63
<b>Figura 60.</b> Gráfica de velocidad del eje X .....	64
<b>Figura 61.</b> Gráfica de velocidad del eje Y .....	64
<b>Figura 62.</b> Gráfica de velocidad del eje Z.....	65

<b>Figura 63.</b> Gráfica de las posiciones del dron en los ejes X, Y, Z.....	66
<b>Figura 64.</b> Gráfica de velocidad del dron. ....	66
<b>Figura 65.</b> Código de programación del sistema de fumigación .....	67
<b>Figura 66.</b> Simulación del sistema de fumigación en funcionamiento .....	68
<b>Figura 67.</b> Resultado de la simulación del sistema de fumigación .....	68
<b>Figura 68.</b> Resultados de la encuesta realizada.....	75
<b>Figura 69.</b> Circuito de conexión del sistema de propulsión.....	77
<b>Figura 70.</b> Selección de la boquilla por tabla.....	78

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Parámetros de calificación de la configuración del dron.....	19
<b>Tabla 2</b> Análisis cuantitativo configuración de alternativas .....	19
<b>Tabla 3</b> Ficha técnica HGS T10.....	20
<b>Tabla 4</b> Ficha técnica M4E .....	21
<b>Tabla 5</b> Ficha técnica Agras T10 .....	21
<b>Tabla 6</b> Ficha técnica XAG P30.....	22
<b>Tabla 7</b> Parámetros de calificación dron comercial.....	22
<b>Tabla 8</b> Análisis cuantitativo dron comercial .....	23
<b>Tabla 9</b> Selección del controlador.....	24
<b>Tabla 10</b> Parámetros de evaluación para controlador .....	25
<b>Tabla 11</b> Evaluación ponderada para controlador.....	26
<b>Tabla 12</b> Selección de la bomba para el sistema de fumigación.....	26
<b>Tabla 13</b> Parámetros de la selección de la bomba.....	27
<b>Tabla 14</b> Evaluación ponderada para la bomba de fumigación .....	27
<b>Tabla 15</b> Requerimientos básicos para el dron cuadricóptero .....	28
<b>Tabla 16</b> Componentes de pulverización .....	31
<b>Tabla 17</b> Estimación de peso .....	32
<b>Tabla 18</b> Especificaciones del Motor P 80 KV 120.....	33
<b>Tabla 19</b> Especificaciones de las Hélices MF2815R .....	34
<b>Tabla 20</b> Especificaciones del ESC.....	35
<b>Tabla 21</b> Especificaciones de la batería Diamond Foxtech .....	36
<b>Tabla 22</b> Propiedades físicas del UHM.....	39
<b>Tabla 23</b> Propiedades físicas del Aluminio aeroespacial 6061-T6.....	43
<b>Tabla 24</b> Constantes para el cálculo del empuje mínimo.....	45
<b>Tabla 25</b> Constantes para el cálculo del sistema de pulverización .....	49
<b>Tabla 26</b> Resultados de la simulación aerodinámica del dron .....	54
<b>Tabla 27</b> Costos de los componentes .....	69

## **RESUMEN**

El presente trabajo de titulación, surge como una necesidad para pequeños o medianos agricultores que se dedican a la fumigación de cultivos de frutilla, debido a esto se propone el diseño de un dron fumigador de ocho litros de capacidad con el fin de precautelar la salud del agricultor expuesto a los agroquímicos. El análisis de alternativas permitió determinar la configuración cuadricóptero, como la más viable para el proyecto.

Se seleccionó la fibra de carbono UHM y el aluminio aeroespacial 6061 T6 como los materiales más óptimos. Mediante el cálculo de elementos mecatrónicos se escogió el sistema de propulsión y los componentes de fumigación más adecuados. El dron diseñado se generó en SolidWorks para su análisis estático y aerodinámico. Este diseño se simuló con clima cálido y templado mediante software apropiado resultando en un dron fumigador de 22kg, con un tiempo de vuelo de 18 minutos por hectárea y una eficiencia del 85% que facilita su viabilidad.

**Palabras clave:** Aerodinámico, agroquímicos, cultivos de frutilla, dron cuadricóptero, fumigación.

## **ABSTRACT**

The present titling work arises as a necessity for small or medium-sized farmers who are dedicated to the fumigation of strawberry crops, due to this, the design of an eight-liter capacity fumigator drone is proposed in order to protect the health of the farmer exposed to agrochemicals. The analysis of alternatives allowed determine the quadcopter configuration, as the most viable for the project.

UHM carbon fiber and 6061 T6 aerospace aluminum were selected as the most optimal materials. By calculating mechatronic elements, the most suitable propulsion system and fumigation components were chosen. The designed drone was generated in SolidWorks for its static and aerodynamic analysis. This design was simulated with a warm and temperate climate using appropriate software, resulting in a 22kg spray drone, with a flight time of 18 minutes per hectare and an efficiency of 85% that facilitates its viability.

**Keywords:** Aerodynamic, agrochemicals, strawberry crops, quadcopter drone, fumigation.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la agricultura el proceso más importante es la fumigación, este proceso controla las plagas, insectos y enfermedades de los cultivos, las sustancias utilizadas representan riesgos en la salud del agricultor [1].

El traje que se utiliza no es suficiente para el operario expuesto a estos químicos, por lo que estas personas comienzan a padecer diversos tipos de enfermedades, la exposición a los agroquímicos se asocia en un aumento de padecer cáncer, si la exposición es de manera directa y por lapsos prolongados de tiempo [2].

La desinfección de los sembríos es uno de los procedimientos más costosos para los pequeños agricultores, debido a la mano de obra requerida y pérdida de recursos agrícolas. Se requiere de 4 a 7 desinfecciones desde la siembra hasta la cosecha, esto depende según el tipo de cultivo. Los dos métodos utilizados para llevar a cabo este proceso incluyen la fumigación manual y maquinarias como los tractores o aeronaves [3].

El número de fumigaciones depende de la estación y las plagas que puedan afectar a los sembríos, el tiempo de fumigación manual en destapar el depósito, llenado, tapado, posicionado de la bomba y fumigación es de aproximadamente 21 minutos por cada 200 metros cuadrados, por lo que si se desea fumigar una hectárea el tiempo será de 17 horas de trabajo por persona, si fumigan tres operarios en la misma hectárea tendrían cada uno 6 horas de trabajo aproximadamente, los operarios pueden realizar de 2 a 4 fumigaciones dependiendo la estación. El dron profesional existente en el mercado es muy costoso, siendo poco viable para un agricultor pequeño y mediano [4].

## **JUSTIFICACIÓN**

Actualmente la fumigación de los cultivos se realiza mediante los métodos convencionales tales como la fumigación manual y estacionaria. La fumigación desempeña un papel crucial en la eliminación de enfermedades y la desinfección de los cultivos, el tiempo requerido para realizar este proceso es excesivo, ya que lo vuelve peligroso para el usuario durante la manipulación de los diferentes químicos que constituyen los pesticidas, estos pueden resultar tóxicos para la salud humana. Por lo que el desarrollo de un dron fumigador que cumpla con las funciones básicas, específicas y de fácil uso, es de gran importancia en el sector agrícola, ya que es una propuesta tecnológica que podría reducir los costos de la fumigación de cultivos, incrementando la eficiencia y reduciendo el tiempo de fumigación [5].

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Diseñar y simular un dron fumigador con capacidad de ocho litros para cultivo de frutilla.

### **Objetivo específico**

- Analizar los sistemas tradicionales de fumigación en cultivos de frutilla para la planificación de alternativas de solución.
- Diseñar un prototipo de dron y el sistema fumigador mediante software CAD para el cálculo de elementos mecatrónicos.
- Simular el prototipo diseñado con clima cálido y templado mediante software apropiado para validar el desempeño del equipo en una hectárea.

# **CAPÍTULO 1**

## **MARCO TEÓRICO**

Este capítulo detalla la justificación, con información teórica cuyo objetivo es proporcionar una comprensión de las definiciones fundamentales del tema abordado en el trabajo de titulación.

### **1.1 La agricultura en el Ecuador**

Es un tema importante en la economía del país y sus sistemas de producción priorizan los ingresos económicos sobre la conservación de los recursos naturales. La producción especializada industrial ha propiciado la gran expansión del cacao, las flores, el arroz, las frutillas y las zanahorias, donde el uso de los pesticidas es una parte esencial para el manejo agronómico, para lograr un control visible de plagas y enfermedades de las diferentes cosechas [6].

Según el informe del Ministerio de Agricultura, el desarrollo económico del Ecuador se ha basado históricamente en la producción agropecuaria y tiene una gran importancia en la economía de la sociedad [7].

### **1.2 Importancia de la fumigación en los cultivos de frutilla**

La importancia de la fumigación en este tipo de cosechas se da debido a las diversas enfermedades que afectan la vida de la planta. La fumigación es importante para obtener una mayor rentabilidad de los cultivos de frutilla. También es necesario detectar brevemente posibles enfermedades en las plantaciones para mantener la calidad y sanidad de la cosecha [8].

### **1.3 Las plagas más relevantes en el cultivo de frutilla**

Las plagas más relevantes que afectan al cultivo de frutilla son las siguientes:

#### **1.3.1 Gusanos cortadores**

Las plagas afectan las raíces y el tallo de la planta, así como las hojas durante los primeros 15 a 30 días del ciclo de la planta, y en algunos casos, durante todo el ciclo. También, pueden dañar la corona de la planta y, en ocasiones, los frutos, causando la formación de galerías [9].

### **1.3.2 Cutzo**

Durante la fase de desarrollo, este insecto genera una actividad alimentaria que consiste en consumir hojas y tallos, afectando significativamente la corona de la planta. Además, la alimentación también puede provocar daños considerables en las raíces primarias y secundarias, lo que puede afectar gravemente la plantación [9].

### **1.3.3 Áfidos o Pulgón de la frutilla**

Esta plaga daña las plantas mediante la succión de la savia, lo que detiene el crecimiento. Lo más preocupante es que, a través de este proceso, puede transmitir enfermedades virales a las plantas. El desarrollo de nuevas poblaciones de esta plaga se favorece en climas secos [9].

### **1.3.4 Ácaros o Arañita Bimaculada**

Los daños causados por esta plaga comienzan a manifestarse a principios de la época seca. Es posible notar la aparición de pequeñas manchas amarillas en la parte inferior de las hojas y en casos más graves, las hojas pueden adquirir una coloración marrón-rojiza y marchitarse [9].

### **1.3.5 Trips**

Esta plaga afecta principalmente a los frutos, hojas y flores en desarrollo, y es común en épocas secas con temperaturas altas. Al succionar los jugos, causa daños en las hojas, flores y frutos, lo que permite la entrada de diferentes enfermedades a través de las heridas producidas [9].

### **1.3.6 Gastrópodos**

Los caracoles y las babosas son animales que tienen actividad principalmente durante la noche y tienden a descansar durante el día, escondiéndose en áreas húmedas. Se puede identificar fácilmente debido a la secreción que dejan. Estos animales pueden causar daño a las plantas afectadas [9].

## **1.4 Enfermedades más relevantes en el cultivo de frutilla**

Las enfermedades más relevantes que afectan al cultivo de frutilla son las siguientes:

### **1.4.1 Botrytis**

Este hongo afecta negativamente a los frutos de la frutilla, ocasionando el ablandamiento y la aparición de una capa blanquecina en la superficie. La humedad elevada y las temperaturas bajas favorecen el desarrollo, y pueden ingresar a la fruta sin necesidad de alguna herida. Durante la recolección de los frutos, es posible que las frutas sanas se contaminen con alguna espora del hongo proveniente de los frutos infectados. La manipulación excesiva de los frutos y cualquier

factor que produzca daños en los mismos pueden contribuir a la propagación de esta enfermedad [9].

#### **1.4.2 Antracnosis**

Cuando se presenta esta enfermedad en el fruto de la frutilla, se observa una mancha suave de color marrón que afecta la consistencia del fruto, impidiendo el transporte. La enfermedad produce una rápida descomposición del fruto, el cual se vuelve acuoso en un período menor a 12 horas [9].

#### **1.4.3 Oídio**

Este hongo es ampliamente distribuido en zonas donde la humedad es elevada y el clima es frío. Los efectos son principalmente notorios en las hojas, flores y frutos de la planta. Un síntoma que lo identifica claramente es la curvatura hacia arriba de los bordes de las hojas y un micelio desarrollado con un velo blanquecino. En casos más graves, el envés de las hojas puede presentar un tono rojizo [9].

#### **1.4.4 Pudrición roja**

Durante el período de sequía, esta enfermedad puede provocar el marchitamiento de las hojas, especialmente en el segundo año de cultivo, ya que afecta todo el sistema radicular. Esta enfermedad suele manifestarse en áreas con bajas temperaturas. Los síntomas incluyen hojas nuevas de tonalidad verde pálido y hojas marchitas con tonos amarillo-rojizos. Además, las raíces de las plantas afectadas adquieren un color oscuro y se puede observar que el interior es de color rojo [9].

#### **1.4.5 Verticilosis**

Esta enfermedad se suele observar en áreas específicas del cultivo. En ocasiones, se confunde con la falta de agua, ya que afecta al sistema vascular de la planta. Ataca tanto a las raíces, coronas y tejidos. Los síntomas más notorios incluyen la marchitez de las hojas, así como el secado de los tejidos afectados [9].

### **1.5 Sustancias químicas y biológicas para el cuidado y tratamiento de la frutilla**

Los productos químicos conocidos como pesticidas, también denominados plaguicidas, tienen la capacidad de producir efectos nocivos en los seres vivos debido a la alta toxicidad. Esto puede afectar la seguridad alimentaria. Sin embargo, el uso de estos químicos en la agricultura resulta beneficioso, ya que incrementa el rendimiento de los cultivos [10].

### **1.5.1 Métodos de control de plagas**

La fumigación se utiliza comúnmente en el sector agroindustrial para controlar o eliminar plagas. Históricamente, se ha llevado a cabo de forma manual o con maquinaria pesada. Los métodos tradicionales de fumigación varían según la clasificación de las plagas a combatir, la frecuencia de fumigación, el tamaño y uso del cultivo. Los sistemas de fumigación tradicionales son simples, como una fumigadora manual para áreas más pequeñas, o estacionarios para cultivos de mayor tamaño que requieren una mayor área de fumigación. Los métodos de fumigación que se utilizan actualmente son los siguientes [11].

- **Fumigador manual**

La fumigadora de mano se emplea para distribuir químicos en áreas de tamaño reducido. Es una herramienta práctica para el manejo de plagas en cultivos pequeños o zonas de difícil acceso. Esta máquina está compuesta por un tanque de plástico de alta densidad con una capacidad de almacenamiento de hasta 20 litros de líquido. La manguera, fabricada con caucho reforzado, es un componente crucial de la máquina. También se encuentra la cámara de presión, fundamental para el sistema de bombeo, que requiere un mantenimiento regular para prevenir complicaciones. La fumigadora manual cuenta con un regulador de flujo que permite controlar la cantidad de líquido aplicado y evitar obstrucciones en la bomba mediante el uso de filtros. Además, está equipada con una lanza de latón de 60 cm y una boquilla que permite cambiar el tipo de pulverización. En resumen, esta herramienta es ideal para la aplicación de químicos en áreas de tamaño reducido [11].

- **Fumigadora estacionaria**

La fumigadora estacionaria, también conocida como fumigadora motorizada, es un equipo agrícola desarrollado para hacer eficiente el proceso de rociado en los campos de cultivo. Esta máquina consta de un depósito que almacena líquidos, el cual se somete a presión para lograr que las gotas tengan un tamaño uniforme y caigan a la misma distancia. Su principal función es mejorar el proceso de aspersión y, en determinadas situaciones, es capaz de rociar diferentes líquidos, como agua, pesticidas y diferentes químicos, para prevenir posibles plagas. Además, al contar con mangueras flexibles que transportan el líquido a una determinada distancia, los trabajadores no tendrán que cargar manualmente los líquidos, lo que se traduce en un mayor rendimiento en el trabajo [11].

## **1.6 Situación de los agroquímicos en Ecuador**

En Ecuador, es necesario prestar especial atención al uso de agroquímicos, especialmente plaguicidas, debido a la creciente promoción en el uso y a las evidencias de los efectos perjudiciales. Además, existe escasez de información sobre cómo aplicarlos adecuadamente, una supervisión insuficiente, sobredosisificación y una mala gestión de los residuos. Según el INEC de 2017, el 46% de quienes aplican agroquímicos en el campo son agricultores, seguidos por un 37% de trabajadores y un 13% de personas sin experiencia en labores agrícolas [6].

## **1.7 Consecuencias de los pesticidas en la salud**

Los pesticidas suponen un grave riesgo para la salud humana cuando se tiene contacto con estos químicos. Estas actividades peligrosas incluyen mezclar y aplicar los pesticidas, consumir alimentos con residuos y beber agua contaminada con estos residuos. Estas actividades diarias han dado lugar a varios envenenamientos accidentales. Incluso el uso frecuente de plaguicidas puede representar una amenaza seria para la salud humana. Se estima que al menos 25 millones de jornaleros y agricultores en todo el mundo se envenenan accidentalmente con los plaguicidas cada año [12].

Los estudios muestran que el uso de pesticidas puede estar asociado con varias enfermedades, como el cáncer, la leucemia, la enfermedad de Parkinson, el asma y enfermedades cognitivas, etc. Además, los efectos sobre la salud humana dependen de la exposición y concentración de estos químicos. Los grupos más vulnerables a estos químicos son los niños, mujeres embarazadas y grupos de tercera edad [12].

## **1.8 Optimización de los procesos en la fumigación**

El objetivo es reducir o eliminar el tiempo perdido, los recursos y los costos, entre otros, para lograr las metas del proceso. Lo importante son las herramientas, técnicas y recursos tecnológicos que se utilicen con el fin de optimizar estos procesos de manera eficiente [4].

## **1.9 Uso del dron**

En la actualidad, el dron es muy utilizado en varias áreas, como la vigilancia, los espectáculos aéreos, la seguridad, el servicio de entrega a domicilio, etc. Estos vehículos no tripulados se utilizan en la agricultura debido a la precisión, de las cámaras y sensores. Esto permite a los trabajadores generar estrategias y planificar las posibles fumigaciones en las diferentes cosechas [13].

### **1.9.1 Configuración del dron para la agricultura**

Existen diferentes alternativas en el mercado internacional para la agricultura. El cuadricóptero y la aeronave de ala fija, son los más utilizados en este campo. El tipo de dron dependerá del propósito a utilizar [14].

### **1.9.2 Aplicaciones en el sector agrícola**

El propósito de las aeronaves no tripuladas es acelerar y ayudar en varios procesos, como la siembra, el apoyo en la identificación de tierras aptas para el cultivo, el monitoreo de cultivos y la identificación de posibles amenazas, así como la fumigación de las siembras. Estas aplicaciones principales son las que debe tener un dron para el sector agrícola. Son dispositivos altamente versátiles en una amplia gama de aplicaciones agrícolas, que se detallan a continuación [15].

- **Monitoreo de cultivos**

El dron cuenta con diferentes tipos de sensores que detectan ondas de luz absorbidas y reflejadas por los cultivos, generando imágenes que destacan las zonas más conflictivas en un área de cultivo mediante un contraste de colores. Estas imágenes se generan mediante la utilización de tecnología satelital, aeronaves no tripuladas y aviones. El NDVI se calcula a partir de la radiación de luz visible con la infrarroja y un valor alto indica una alta densidad de cultivos, mientras que un valor bajo puede indicar áreas conflictivas en un campo de cultivo [11].

- **Seguimiento de enfermedades en la agricultura**

Es esencial que los agricultores evalúen regularmente la salud de los cultivos y detecten plagas o enfermedades en las plantas. En el pasado, la evaluación del estado de las plantas era una tarea tediosa y que requería mucho tiempo para los agricultores, ya que debían visitar la zona personalmente. No obstante, el uso de aeronaves no tripuladas ha permitido a los trabajadores cubrir una gran superficie en un mínimo tiempo y sin tener que trasladarse físicamente para verificar el estado de las plantas. La monitorización de enfermedades mediante estos sistemas ha demostrado ser un éxito en varias partes del mundo, como el dron eBee, que se utiliza para detectar enfermedades o plagas en los cultivos. Esto es posible gracias al uso del infrarrojo cercano, lo que permite a los agricultores distinguir los indicadores de estrés en las plantas y capturar imágenes de actividad fotosintética con anticipación [11].

- **Aspersión de agroquímicos y fertilizantes**

La fumigación es una parte crucial de la agricultura de precisión y suele ser realizada por pulverizadores

terrestres o aviones agrícolas. No obstante, actualmente es posible llevar a cabo esta tarea utilizando aeronaves no tripuladas, como en el caso de los trabajadores japoneses, quienes utilizan estos sistemas para rociar el 40% de los campos de arroz. Esta alternativa resulta mucho más económica que la aviación agrícola convencional, debido a que consume menos combustible y tiene un menor costo. Estas aeronaves pueden ser empleadas para rociar distintos tipos de productos químicos fitosanitarios, como insecticidas, fungicidas y herbicidas [11].

### **1.10 Comportamiento de vuelo**

La explicación de la dinámica del vuelo del dron es relativamente simple. El movimiento en el aire depende principalmente de los rotores y hélices que lo componen, los cuales se controlan mediante las revoluciones por minuto que generan y la dirección en la que giran para garantizar la estabilidad. Las tres variables principales que definen la trayectoria de un dron incluye la posición espacial, altitud y sistema de vuelo. Estos aspectos están influenciados por elementos como la inclinación, desplazamiento lateral y giro, que se relacionan directamente con los componentes de vuelo del dron [16].

### **1.11 Componentes esenciales de un dron fumigador**

El dron está compuesto por varias partes principales, las cuales son esenciales para el funcionamiento adecuado. Estas partes son las siguientes:

- **Chasis**

El cuerpo del dron es la parte fundamental que sostiene todas las piezas, funcionando como una estructura principal que une las diferentes partes. La forma del cuerpo puede variar según los requerimientos específicos del diseño del dron, lo cual está estrechamente relacionado con la cantidad de rotores que se utilizarán. Por lo general, el cuerpo del dron se construye con fibra de carbono y diferentes tipos de plásticos, seleccionados de acuerdo a las características necesarias, tanto en términos de dureza como de peso [17].

- **Cruceta**

Es la parte del dron que conecta las barras que sostienen los rotores. El nombre proviene de esta característica. El cableado se encuentra en el interior de la estructura, la cual está conectada al chasis con la base de los rotores [17].

- **Hélices**

Estos componentes son esenciales para generar la aerodinámica, lo que permite que el dron se eleve en el aire. Para que esto suceda, la energía cinética generada debe ser mayor que el peso del dron [17].

- **Aspersores**

Los aspersores de pulverización son elementos de gran precisión diseñados para garantizar un control adecuado de la cantidad de agroquímico que se dispersa. Estas boquillas tienen como objetivo garantizar la homogeneidad en la aplicación del agroquímico, la eficacia en la cobertura y la dosificación adecuada en función de la potencia utilizada [17].

- **Multirrotores**

Los multirrotores son aeronaves que se basan en el diseño de los helicópteros y utilizan varios mecanismos de propulsión para volar. La estabilidad en el aire de esta máquina depende del uso del ‘par motor’, el cual permite compensar los movimientos y mantener una posición estable. Además, los movimientos son influenciados por la rotación de las hélices y la velocidad. Para generar empuje y sustentación en un dron, es necesario hacer uso de las compensaciones de potencia. Estos dispositivos son de diversos tipos, dependiendo de la cantidad de rotores que utilicen [17].

## **1.12 Sistema de propulsión eléctrico**

El sistema de elementos que generan el movimiento y la propulsión eléctrica en un dron se compone de tres elementos principales: rotores, variador de velocidad y hélices. Estos componentes son esenciales para el desplazamiento y manejo del dron en el aire [17].

- **Variador de velocidad**

La Figura 1 presenta un ejemplo de un dispositivo de variador de velocidad, también conocido como ESC, que es capaz de sincronizar las revoluciones de los motores con los impulsos trifásicos esenciales para reproducir sus movimientos [17].

*Figura 1 Variador de velocidad ESC [17].*



- **Motor eléctrico de DC**

Tienen como función principal transformar la electricidad en energía mecánica mediante el uso de bobinas. Esta transformación es esencial para el funcionamiento de los vehículos aéreos no tripulados que emplean motores eléctricos de corriente continua (DC). Se emplean en casos particulares de alteración rápida y variable de la potencia. Necesitan ser alimentados por una fuente externa DC, la cual puede ser proporcionada por baterías o pilas para el correcto funcionamiento. Asimismo, debido a que el uso depende del tamaño y la corriente necesaria, son muy versátiles y se adaptan a diversas situaciones [17].

- **Motores Brushless**

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de un motor Brushless. Estos motores sin escobillas no requieren piezas mecánicas de contacto y presentan varias ventajas en comparación con los predecesores que sí las tienen. Entre las ventajas se encuentran un menor peso y menor mantenimiento debido a la ausencia de escobillas. También son más confiables, ya que no producen chispas al no contar con escobillas. No obstante, la principal desventaja radica en que se requiere un controlador electrónico de velocidad para un mejor rendimiento [17].

*Figura 2 Motor eléctrico Brushless [17].*



### 1.13 Sistema de alimentación del dron

El problema es el intervalo de recarga de las baterías y por lo tanto, tiene un tiempo de inactividad, lo que crea una interrupción y afectando a la productividad. La duración de vuelo dependerá del consumo de electricidad. Para permanecer en el aire, la duración de vuelo suele oscilar entre 20 a 40 minutos, estará sujeta a las dimensiones y al peso del dron, así como a la carga que transporte. La dimensión de la batería es muy importante, este tipo de batería también varía según el dron y el propósito para el que va a ser utilizado [18].

Los sistemas de alimentación son responsables de proporcionar energía al dispositivo, lo cual se logra a través del uso de baterías. Al elegir una batería para un dron, se deben considerar aspectos como el peso ligero, larga duración de batería y capacidad de almacenamiento amplia. Existen cinco tipos de baterías disponibles para este propósito, incluyendo baterías de níquel, de plomo, de iones de litio, etc. En el contexto de esta investigación, se utilizará la batería de LiPo [18].

- **Baterías de LiPo**

La Figura 3 muestra un ejemplo de batería de litio. Estas baterías representan una mejora respecto a las baterías de iones, ya que tienen una alta capacidad de energía y una variación de carga y descarga más rápida, lo que las hace más eficientes. También cuenta con mayor capacidad de carga, menor tamaño y una tasa de descarga alta [18].

*Figura 3* Batería de lipo [18].

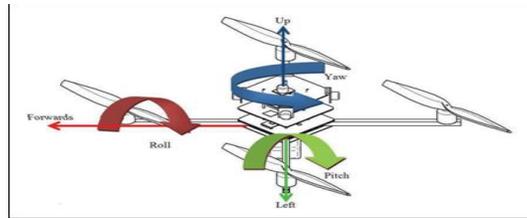


- **Controlador de vuelo**

La Figura 4 muestra un ejemplo de un sistema de referencia de la aeronave. El sistema de vuelo es crucial para el funcionamiento del dron, ya que actúa como el cerebro del mismo. La principal función es enviar órdenes a cada rotor para que gire a una velocidad específica en RPM, lo que ayuda a estabilizar el dron. Además, trabaja en conjunto con el sistema GPS para la realización de vuelos estáticos como rutas programadas. Para facilitar aún más el vuelo, se utilizan algoritmos de

control como el PID. Es importante destacar que el controlador de vuelo forma parte del diseño preliminar del dron [18].

*Figura 4* Sistemas de referencia de la aeronave [18].



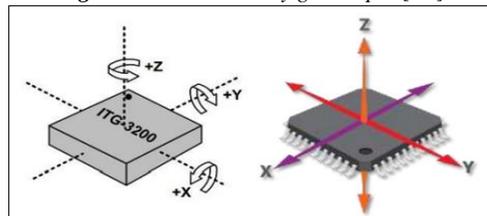
### 1.14 Sistema de sensores y actuadores

El sistema de sensores y actuadores en el dron permite el funcionamiento autónomo. Los sensores recopilan datos del entorno y los actuadores responden ajustando los movimientos del dron. Esta interacción permite una navegación precisa en tiempo real. A continuación, se describen algunos sensores [19].

- **Acelerómetro y giroscopio**

La Figura 5 muestra un ejemplo de un acelerómetro y giroscopio. El acelerómetro es un componente que mide tanto la aceleración estática como dinámica del dron. Por lo general, este componente viene acompañado de un giroscopio que calcula la posición. En resumen, el acelerómetro calcula la posición, mientras que el giroscopio mide los ángulos de las posiciones del dron [19].

*Figura 5* Acelerómetro y giroscopio [19].

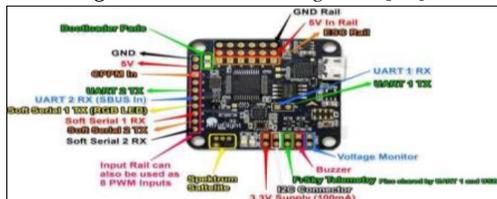


- **Barómetro**

Mide la altitud y la presión del aire, ya que es empleado por el sistema de control de vuelo para mantener la altitud de la aeronave.

La Figura 6 presenta el barómetro integrado a una controladora [19].

Figura 6 Barómetro integrado [19].



### 1.15 Sistema de fumigación

El sistema incluye todos los componentes que permiten la fumigación en el dron cuadricóptero.

- **Boquillas rociadoras**

Tienen la capacidad de convertir el líquido en energía cinética mediante la descomposición del líquido en partículas más pequeñas. Esta técnica permite distribuir uniformemente el líquido en toda el área a utilizar. La determinación de cierto parámetro se realiza en función del diámetro interno del conducto y la presión que se ejerce en dicho conducto [19].

- **Bombas de agua**

Es un mecanismo diseñado para trasladar líquidos de un lugar a otro y, al mismo tiempo, aumentar la energía cinética del flujo. Estas bombas se utilizan para bombear una variedad de líquidos, incluyendo agua o líquidos con aditivos químicos u otros fluidos diversos [19].

- **Tanque de almacenamiento**

Un tanque de almacenamiento es un contenedor utilizado para la manipulación y almacenamiento de diversas sustancias, como gases, líquidos y productos químicos esenciales, como pesticidas y herbicidas [19].

- **Medidor de flujo**

Son dispositivos que supervisan la velocidad de flujo de un líquido o gas para el control. La principal función es proporcionar una lectura precisa y en tiempo real del caudal [19].

- **Tubería**

Son tubos largos y flexibles fabricados de goma, para transportar líquidos de un lugar a otro [19].

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Este capítulo presenta posibles opciones para resolver la complejidad principal del diseño. Este análisis será de gran utilidad para elegir la mejor alternativa a implementar y abordar la situación de manera efectiva.

#### 2.1 Identificación de las necesidades

Los cultivos de frutilla hidropónica se pueden desarrollar tanto en invernaderos como en campo abierto. Este análisis se enfoca en la fumigación a campo abierto. Este tipo de fumigación normalmente se realiza con fumigadores manuales tipo mochila, donde los trabajadores fumigan grandes hectáreas de frutilla. Para acelerar el proceso, se requiere de tres o más trabajadores que fumiguen una hectárea por hora. Según la encuesta realizada a los agricultores, los sistemas empleados para fumigar deben alcanzar zonas inaccesibles, contar con un tiempo de vuelo óptimo, tener una buena carga útil y fácil de montar. Los resultados de la encuesta se encuentran en el Anexo 1 [9].

La Figura 7 presenta la fumigación de cultivos de frutilla a campo abierto.

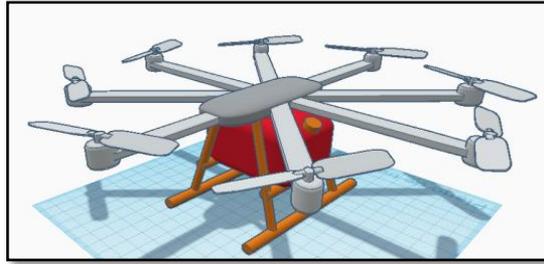
*Figura 7 Cultivos de frutilla a campo abierto [9].*



#### 2.2 Análisis del tipo de dron

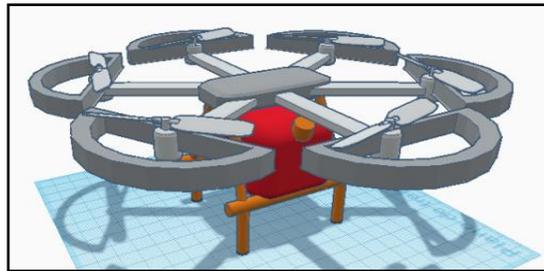
La alternativa uno tiene la configuración de un octocóptero. Este tipo de dron fumigador, dispone de ocho hélices, lo que permite levantar cargas útiles pesadas, mayor capacidad de vuelo y estabilidad en el aire. Por lo general, se emplea para tanques de treinta o más litros de capacidad, lo vuelve costoso para pequeños y medianos agricultores. La batería se agota rápidamente debido al peso que lleva, lo que limita los tiempos de vuelo y requiere de recargas frecuentes. La Figura 8 presenta el croquis del dron [20].

*Figura 8 Boceto de un dron fumigador con ocho hélices.*



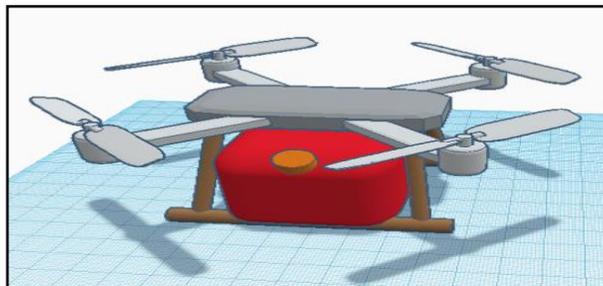
La alternativa dos tiene la configuración de un hexacóptero. Es un dron fumigador que cuenta con seis hélices. Puede estar parcialmente cubierto o sin protección. Por lo general, se emplea para tanques con un volumen de veinte o más litros. El diseño asegura estabilidad durante el aterrizaje y calidad de vuelo. La Figura 9 presenta el croquis del dron [20].

*Figura 9 Boceto de un dron fumigador con seis hélices.*



La alternativa tres tiene la configuración de un cuadricóptero. Es un dron fumigador con cuatro hélices, muy flexibles y con buena sustentación. Puede volar fácilmente en todas las direcciones, con mejor estabilidad. Por lo general, se emplea para tanques con volúmenes de seis o más litros. Es más económico para los pequeños y medianos agricultores que desean incorporar esta tecnología en los cultivos. La Figura 10 presenta el croquis del dron [20].

*Figura 10 Boceto de un dron fumigador con cuatro hélices.*



## 2.3 Análisis cuantitativo

Con este método, se analizará el tipo de dron necesario, ya sea un cuadricóptero, hexacóptero u octocóptero, los cuales se utilizan en el ámbito agrícola. En la Tabla 1 se presenta el rango de calificación utilizado.

*Tabla 1 Parámetros de calificación de la configuración del dron.*

Rango	Parámetros
0 - 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo</li> <li>• Difícil de encontrar</li> <li>• Piezas difíciles de mecanizar</li> <li>• No existe elementos en el mercado</li> <li>• Mecanismo deficiente</li> </ul>
4 - 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo moderado</li> <li>• Medianamente de encontrar</li> <li>• Puede encontrarse en el mercado</li> <li>• Mecanismo de eficiencia media</li> </ul>
8 - 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo bajo</li> <li>• Fácil de encontrar en el mercado</li> <li>• Mecanismo de alta eficiencia</li> </ul>

La Tabla 2 presenta el análisis cuantitativo con calificación ponderada, la que permite determinar la mejor alternativa en relación a los parámetros dados. En este caso, la mejor alternativa resulta ser un dron fumigador cuadricóptero. Los parámetros mencionados asignan una puntuación según la importancia de cada uno, destacando el costo, la disponibilidad de materiales en el mercado y la seguridad como los parámetros más relevantes, con un peso del 20% cada uno.

*Tabla 2 Análisis cuantitativo configuración de alternativas.*

		%	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3			
<b>A</b>	Costo	20	2	0,4	6	1,2	10	2
<b>B</b>	Facilidad de operación	10	9	0,9	9	0,9	9	0,9
<b>C</b>	Existencia del material	20	7	1,4	8	1,6	9	1,8
<b>D</b>	Facilidad de montaje	10	7	0,7	8	0,8	9	0,9
<b>E</b>	Seguridad	20	8	1,6	9	1,8	8	1,6
<b>F</b>	Vida útil del producto	10	10	1	10	1	10	1
<b>G</b>	Estética del producto	10	9	0,9	8	0,8	8	0,8
Total				6,9		8,1		9

## 2.4 Estudio de mercado

Después de determinar el tipo de dron, se procedió a evaluar los cuadricópteros existentes en el mercado. Durante el análisis, se tuvieron en cuenta aspectos como el diseño, capacidad, eficiencia y costo del dron.

La Figura 11 es la primera alternativa, el dron modelo HGS T10, fumigador de cuatro rotores con

un sistema de rociado de alto rendimiento. Tiene baja potencia y puede pulverizar automáticamente de seis a doce hectáreas por hora. Utiliza baterías inteligentes de carga rápida y tiene varios escenarios de aplicación [21].

*Figura 11 Dron HGS T10 [21].*



En la Tabla 3 se presentan las propiedades generales del dron HGS T10.

*Tabla 3 Ficha técnica HGS T10.*

Distancia entre ejes	1500 mm
Peso	10 kg
Velocidad de vuelo	3-8 m/s
Ancho de pulverización	3-5 m
Peso máximo al despegar	26 kg
Tiempo de vuelo	7 – 10 min

La Figura 12 es la alternativa dos, un dron modelo M4E posee cuatro rotores con un eficiente sistema de fumigación. Está equipado con un tanque de cinco litros de capacidad y puede rociar hasta cinco hectáreas por hora, con un ahorro del noventa por ciento del agua [22].

*Figura 12 Dron M4E [22].*



En la Tabla 4 se presentan las características generales del dron M4E.

**Tabla 4** Ficha técnica M4E.

Distancia entre ejes	1090 mm
Volumen del tanque	5 L
Tiempo de vuelo	5 – 10 min
Velocidad de vuelo	0 – 15 m/s
Ancho de pulverización	4 – 5 m

La Figura 13 es la tercera alternativa un dron modelo DJI Agras T10, es un cuadricóptero fumigador con capacidad de ocho litros y ancho rociador de cinco metros. Puede cubrir quince hectáreas en una hora debido a la estructura de alta calidad que recubre al dron [23].

**Figura 13** Dron DJI AGRAS T10 [23].



En la Tabla 5 se presentan las características generales del dron Agras T10.

**Tabla 5** Ficha técnica Agras T10.

Capacidad	8 kg
Tiempo de vuelo	17 min
Ancho de esparcimiento	7 m
Peso máximo al despegar	24.8 kg
Distancia entre ejes	1958 mm

La Figura 14 es la cuarta alternativa, el dron modelo XAG P30. Cuenta con un mecanismo sencillo de fumigación, que contribuye con la protección del medio ambiente. El sistema de radar multidireccional evita automáticamente los obstáculos presentes en el terreno [24].

*Figura 14 Dron XAG P30 [24].*



En la Tabla 6 se presentan las características generales del dron XAG P30.

*Tabla 6 Ficha técnica XAG P30.*

Dimensiones entre ejes	1560 mm
Peso sin batería	16 kg
Tanque de almacenamiento	16 L
Ancho de pulverización	2 - 6 m
Peso máximo al despegar	38.5 kg
Tiempo de vuelo	10 min

## **2.5 Análisis cuantitativo del dron comercial**

Este método de análisis se centra en determinar el tipo dron comercial más óptimo para el cuadricóptero. En la Tabla 7 se presenta el rango de calificación utilizado para evaluar los criterios de selección.

*Tabla 7 Parámetros de calificación dron comercial.*

<b>Rango</b>	<b>Parámetros</b>
0 - 3	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alto Costo</li><li>• Piezas difíciles de mecanizar</li><li>• No existe elementos en el mercado</li><li>• Mecanismo deficiente</li><li>• Velocidad baja</li><li>• Baja estabilidad</li></ul>
4 - 7	<ul style="list-style-type: none"><li>• Costo moderado</li><li>• Piezas de mecanizado moderado</li><li>• Puede encontrarse en el mercado</li><li>• Mecanismo de eficiencia media</li><li>• Velocidad media</li><li>• Estabilidad media</li></ul>

8 - 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo bajo</li> <li>• Fácil de encontrar en el mercado</li> <li>• Mecanismo de alta eficiencia</li> <li>• Velocidad media alta</li> <li>• Estabilidad alta</li> </ul>
--------	--

Según el análisis cuantitativo con calificación ponderada presentado en la Tabla 8, se ha determinado objetivamente que la mejor alternativa para iniciar el proceso de diseño es la Alternativa 1. Esta alternativa cumple con importantes condiciones como el costo, la facilidad de operación, la existencia de material en el mercado, la facilidad de montaje, la seguridad, la vida útil del producto, la autonomía de vuelo, la capacidad de carga, etc. Tomando en cuenta esta elección como un diseño base, tanto para la elección de componentes como para asegurar que cumpla con los objetivos y requerimientos necesarios.

*Tabla 8 Análisis cuantitativo dron comercial.*

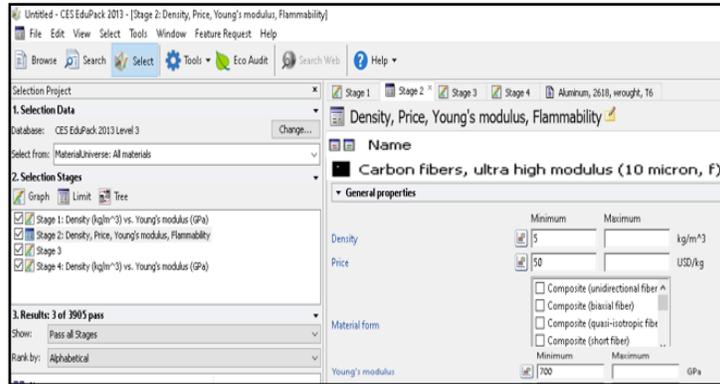
		%	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3		Alternativa 4	
<b>A</b>	Costo	10	9	0,9	7	0,7	7	0,7	6	0,6
<b>B</b>	Fácil operación	10	9	0,9	9	0,9	8	0,8	8	0,8
<b>C</b>	Existencia	10	8	0,8	8	0,8	8	0,8	7	0,7
<b>D</b>	Facilidad de montaje	10	9	0,9	9	0,9	9	0,9	9	0,9
<b>E</b>	Seguridad	10	8	0,8	8	0,8	8	0,8	8	0,8
<b>F</b>	Estética del producto	5	7	0,35	8	0,4	9	0,45	9	0,45
<b>G</b>	Autonomía de vuelo	10	9	0,9	9	0,9	8	0,8	8	0,8
<b>H</b>	Capacidad de carga	15	8	1,2	8	1,2	9	1,35	9	1,35
<b>I</b>	Estabilidad	10	8	0,8	8	0,8	8	0,8	8	0,8
<b>J</b>	Velocidad máxima	10	8	0,8	8	0,8	7	0,7	8	0,8
Total				8,35		8,2		8,1		8

## 2.6 Selección de los materiales

Para seleccionar el material adecuado para el dron, se tuvo en cuenta el peso y la resistencia del material. Se utilizó el software CES Edupack, ya que permite filtrar materiales y seleccionar entre diversas familias disponibles, tomando en cuenta las características esenciales de cada uno [25].

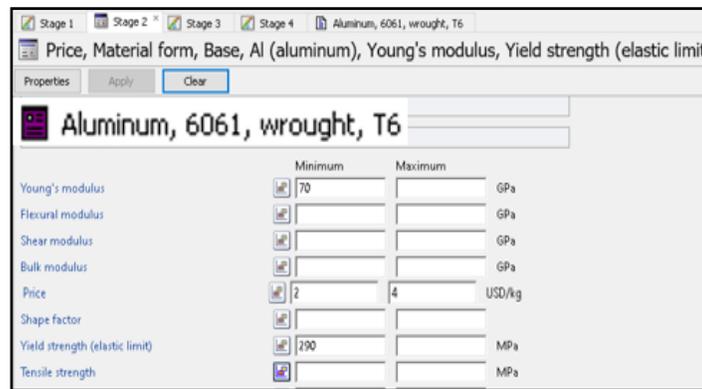
La Figura 15 presenta la selección del primer material para los brazos y soportes del dron. Se estableció ciertos requisitos, como un mínimo de densidad, rigidez y precio. El software determinó la fibra de carbono UHM como el material más óptimo.

**Figura 15** Primer material UHM obtenido por el software.



La Figura 16 presenta la selección del segundo material para la estructura del dron, se estableció ciertos requisitos, como un mínimo de precio, módulo de Young y límite elástico. El software determinó el aluminio aeroespacial 6061-T6 como el material más óptimo.

**Figura 16** Segundo material 6061-T6 obtenido por el software.



## 2.7 Selección del controlador

La controladora de vuelo es esencial para el funcionamiento del dron, ya que se considera el núcleo o cerebro de la aeronave. La principal función es enviar comandos a cada rotor para controlar la velocidad de giro en revoluciones por minuto, lo que permite estabilizar el dron. La controladora de vuelo trabaja en conjunto con el sistema GPS para seguir rutas predefinidas [16].

Existen amplias variedades de controladores de vuelo disponibles en el mercado. La Tabla 9 muestra los tipos de sistemas de control más utilizados y mediante una evaluación ponderada se determina la opción más idónea para el control del dron.

**Tabla 9** Selección del controlador.

Controlador	DJI A3 Pro	Pixhawk Cube	Matek F765-WING
Estabilidad	Alta	Alta	Alta

Capacidad de carga	25- 40 kg	32-45kg	Hasta 15- 25 kg
GPS integrado	Si	Si	No
Compatibilidad	DJI y componentes	Amplia	Amplia
Algoritmos de control	Soporte para PID	PID autoajustable	PID ajuste manual
Aplicaciones	Fumigación	Fumigación, mapeo.	Fumigación.
Costo aproximado	\$700	\$200	\$370

- **Rango de calificación**

La Tabla 10 detalla los parámetros utilizados para evaluar y asignar calificaciones a los parámetros analizados, por medio de un rango de calificaciones.

*Tabla 10 Parámetros de evaluación para controlador.*

<b>Rango</b>	<b>Parámetros</b>
0 - 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto Costo</li> <li>• No existe en el mercado</li> <li>• Baja estabilidad</li> <li>• Baja capacidad de carga</li> </ul>
4 - 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo moderado</li> <li>• Puede encontrarse en el mercado</li> <li>• Estabilidad moderada</li> <li>• Capacidad de carga moderada</li> </ul>
8 - 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo bajo</li> <li>• Fácil de encontrar en el mercado</li> <li>• Alta estabilidad</li> <li>• Capacidad de carga alta</li> </ul>

Durante el análisis, se asignó puntaje a cada parámetro en base a la importancia relativa. Los parámetros destacados más relevantes para la evaluación fueron la capacidad de carga, la interfaz intuitiva, costo y disponibilidad.

Estos factores fueron considerados con un peso aproximado del 20% al 15% en la evaluación final. Luego de realizar un análisis cuantitativo de calificación ponderada de las tres controladoras de vuelo más utilizadas, se determinó que la mejor opción es la controladora de vuelo Pixhawk Cube, como se puede observar en la selección de la controladora de vuelo de la Tabla 11.

**Tabla 11** Evaluación ponderada para controlador.

		%	DJI A3 Pro	Pixhawk Cube	Matek F765-wing			
<b>A</b>	Costo	15	3	0,45	8	1,2	9	1,35
<b>B</b>	Facilidad de operación	10	9	0,9	9	0,9	8	0,8
<b>C</b>	Existencia de material	15	8	1,2	9	1,35	8	1,2
<b>D</b>	Facilidad de montaje	10	7	0,7	7	0,7	7	0,7
<b>E</b>	Estabilidad	10	10	1	10	1	10	1
<b>F</b>	Capacidad de carga	20	8	1,6	9	1,8	7	1,4
<b>G</b>	Interfaz intuitiva	20	9	1,8	10	2	9	1,8
Total			7,65		8,95			8,25

La Figura 17 presenta el controlador seleccionado mediante la evaluación ponderada.

**Figura 17** Controlador Pixhawk cube [16].



## 2.8 Selección de la bomba para fumigación

La selección de la bomba es crucial, ya que debe tener la capacidad de bombear con la fuerza adecuada para lograr una pulverización eficiente en el área. También se consideró la capacidad de regular la presión, ya que esto facilita el control del caudal [26]. La Tabla 12 presenta las bombas más utilizadas en aplicaciones de fumigación.

**Tabla 12** Selección de la bomba para el sistema de fumigación.

Características	Micro Bomba Anselft	Bomba R385 PLUS	Bomba RS-360SH
Tipo de bomba	Diafragma	Centrífuga	Pistón
Presión regulable	Si	Si	Si
Eficiencia	Alta	Alta	Alta
Material	Polímero	Acero, aluminio,	Acero
Peso aproximado	0.2 – 0.4kg	0.5-0.8kg	0.9- 1.4kg
Dimensiones (mm)	90*40*35	52*46*55	42*45*65
Voltaje de trabajo	7- 9 Volts	7- 9 Volts	9-12 Volts

- **Rango de calificación**

En la Tabla 13 se presentan los criterios utilizados para evaluar y asignar calificaciones a los parámetros analizados.

**Tabla 13** Parámetros de la selección de la bomba.

Rango	Parámetros
0 - 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto Costo</li> <li>• Difícil de encontrar</li> <li>• No existe elementos en el mercado</li> <li>• Baja eficiencia</li> </ul>
4 - 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo moderado</li> <li>• Medianamente de encontrar</li> <li>• Puede encontrarse en el mercado</li> <li>• Eficiencia moderada</li> </ul>
8 - 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo bajo</li> <li>• Fácil de encontrar en el mercado</li> <li>• Alta eficiencia</li> </ul>

Se realizó un análisis cuantitativo de calificación ponderada de las tres bombas más utilizadas en el mercado, en base a los parámetros evaluados, se determinó que la Micro Bomba Anselft es la mejor opción, como se observa en la Tabla 14. Durante el análisis, se asignó un puntaje a cada parámetro en función de la importancia relativa. Los parámetros destacados en la evaluación fueron el costo, la disponibilidad en el mercado, el peso y la eficiencia. Estos factores fueron considerados con un peso del 20% en la evaluación final.

**Tabla 14** Evaluación ponderada para la bomba de fumigación.

		%	Micro Bomba Anselft		Bomba R385 PLUS		Bomba RS-360SH	
<b>A</b>	Costo	20	10	2	8	1,6	7	1,4
<b>B</b>	Facilidad de operación	10	9	0,9	9	0,9	9	0,9
<b>C</b>	Existencia en el mercado	20	9	1,8	8	1,6	8	1,6
<b>D</b>	Facilidad de montaje	10	9	0,9	9	0,9	9	0,9
<b>E</b>	Seguridad	20	10	2	10	2	10	2
<b>F</b>	Peso	20	10	2	8	1,6	8	1,6
Total			9,6		8,6		8,4	

La Figura 18 presenta la Micro Bomba Anselft seleccionada.

**Figura 18** Micro Bomba Anselft [26].



## CAPÍTULO 3 DISEÑO

Este capítulo determina el diseño y cálculos necesarios para el modelamiento en CAD del dron fumigador.

### 3.1 Requerimientos del cuadricóptero fumigador

Para determinar los requerimientos para el diseño de un dron fumigador, se encuestó a 21 agricultores sobre las necesidades en la fumigación de cultivos de frutilla. Se aplicaron ocho preguntas que se encuentran en el Anexo 1. Mediante los resultados de la encuesta, se obtienen los requerimientos básicos para el dron fumigador, los cuales se detallan en la siguiente Tabla 15.

*Tabla 15 Requerimientos básicos para el dron cuadricóptero.*

Concepto	Requerimiento
Función	Facilidad de uso, autonomía, capacidad para fumigar sitios inaccesibles, altura de vuelo adecuada y carga útil aceptable.
Fuerzas	Los motores son los encargados de generar la fuerza de propulsión.
Dimensiones	Debe tener un tamaño aceptable que le permita ser compacto.
Materiales	Materiales resistentes, los cuales deben ser livianos.
Ensamblaje	Diseño con fácil montaje y desmontaje.
Costos	La construcción del prototipo debe ser económica y menor al del dron comercial.

### 3.2 Variables dependientes e independientes

Las variables dependientes e independientes para el diseño del dron fumigador son:

- **Variables independientes**

Diseño de un dron. Los indicadores son presión, potencia, velocidad y altura.

- **Variables dependientes**

Fumigación en plantaciones de frutilla. Los indicadores son el caudal, la potencia de la bomba y el volumen del tanque.

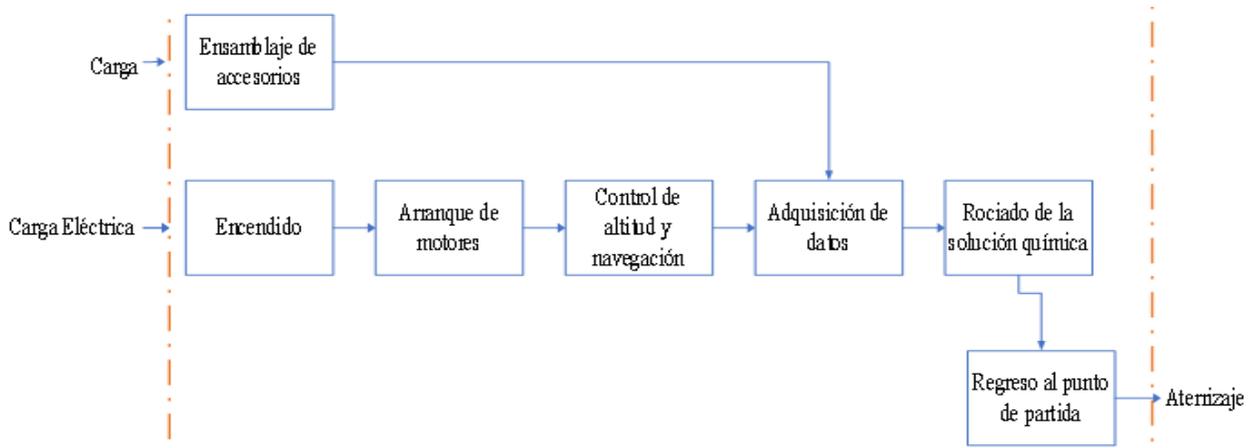
### 3.2.1 Funciones del diseño

Para representar el funcionamiento, se determinó una caja de funciones y un diagrama de bloques.

- **Panel de funciones**

La Figura 19 presenta el panel de funciones con la entrada de las señales, como la alimentación eléctrica, para el diseño del sistema fumigador.

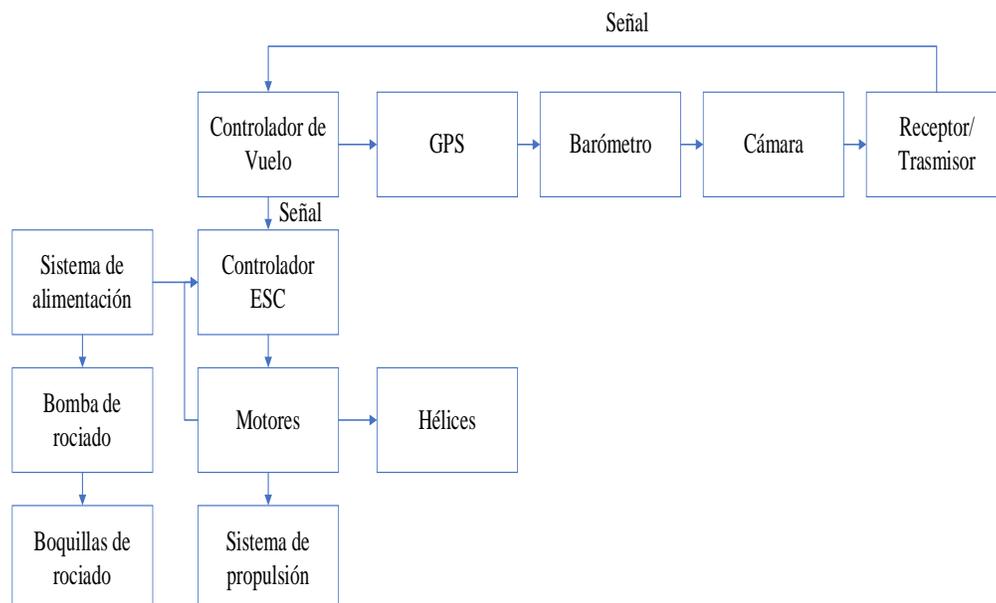
*Figura 19 Panel de funciones del dron.*



- **Funcionamiento del dron**

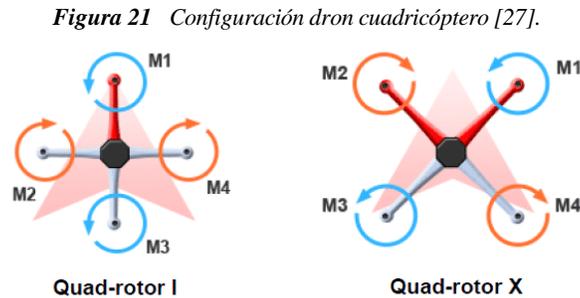
La Figura 20 representa el funcionamiento mediante bloques de los diferentes sistemas que constituyen al dron.

*Figura 20 Esquema del sistema.*



### 3.3 Diseño del dron seleccionado

La Figura 21 representa la configuración seleccionada del sistema aéreo no tripulado. Cuenta con cuatro motores sostenidos por marcos simétricos, formando un ángulo de 90 grados entre sí. Además, tiene dos hélices que giran en dirección horaria y antihoraria. Existen dos diseños disponibles: en cruz y en equis. La configuración más utilizada es en equis, ya que permite utilizar todos los motores para cada movimiento requerido en los tres ejes principales [27].



### 3.4 Componentes del dron fumigador

Se detalla brevemente los componentes principales del dron fumigador cuadricóptero para el funcionamiento general.

- **Hélices**

Permiten el vuelo. Por lo general, son de fibra de carbono. El diseño es aerodinámico y están configurados para diferentes condiciones meteorológicas.

- **Marco**

Es la estructura principal del ensamblaje del dron. Los materiales que se pueden implementar son metales, como el aluminio o la fibra de carbono.

- **Controlador**

Permite el control de vuelo, ya que cuenta con varios procesadores. Es el cerebro del dron fumigador.

- **Motores**

Permiten el movimiento de las hélices y determinan la fuerza de empuje necesaria en el dron. Mediante cálculos, se determinará la fuerza de empuje requerida y se escogerá la opción más óptima.

- **Batería**

La fuente de alimentación del dron es muy importante, y en este caso se optará por baterías de polímero de litio o iones de litio.

- **Tanque**

El diseño del tanque se consideró para una capacidad de ocho litros con material de polímero.

### 3.5 Componentes de pulverización y radar seleccionado

La Tabla 16 muestra los componentes seleccionados en relación al dron del mercado escogido en el análisis cuantitativo, para determinar el tamaño, peso, precisión y eficiencia al momento de fumigar con químicos.

*Tabla 16 Componentes de pulverización.*

<p><b>Boquilla</b></p> 	<p>El modelo XR11001VS es una boquilla de configuración abanico, hecho de acero inoxidable. El ángulo de pulverización es de 110 grados y permite presiones de hasta 4 bares. El Anexo 3 contiene la tabla de selección de la boquilla [28].</p>
<p><b>Medidor de flujo</b></p> 	<p>Es un sensor que se encarga del control del caudal para las cuatro boquillas. Es resistente y tiene un voltaje de trabajo 6v, caudal de 6 l/min, una presión 0.8 Mpa y un peso de 0,2kg [29].</p>
<p><b>Radar</b></p> 	<p>Es un sensor agrícola para altitud, evitar obstáculos y previene colisiones. Permite alta seguridad en el control de vuelo del dron, con una frecuencia de 24 Ghz y un rango máximo de 100 metros [30].</p>

### 3.6 Cálculos para el diseño

Para comenzar con los cálculos, se realizó una estimación del peso, como se muestra en la Tabla 17. Con estos componentes se realizará el diseño, para proceder con el cálculo de la potencia requerida y elección del motor.

*Tabla 17 Estimación de peso.*

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso en kg</b>
Estructura	1	5
Boquilla	4	0.4
Batería	1	5
Controlador y Pmu	1	0.3
Bomba de agua	2	0.4
Medidor de flujo	1	0.2
Tanque	1	0.3
Carga útil	1	8
Cámara	1	0.1
Radar de cobertura	1	0.3
Tubería	4	0.2
Tornillos y conectores	20	0.05
<b>Total</b>		<b>20.25</b>

El peso bruto estimado para el despegue es de 20.25 kg, lo cual permite tener una referencia en la selección del sistema de propulsión. A partir de esta estimación, se calculó el empuje o torque que debe generar cada motor implementado. La relación entre el empuje y el peso determina que este debe ser al menos el doble del peso estimado para vuelos eficientes de aproximadamente 15 minutos. Para la selección de los componentes de propulsión que están regularizados bajo normas, se considera el peso de estos componentes. Según la teoría de aeronaves no tripuladas, representan aproximadamente el treinta o cuarenta por ciento del peso total. Se sobredimensionó el peso total con un 40% adicional de 8.1 kg.

Para determinar la sobredimensión del peso total, se emplea la ecuación (1) y para calcular el empuje que ejercen los motores se emplea la ecuación (2).

$$Tw = 20.25 + \text{Peso}_{40\%} \quad (1)$$

$$T = TW * TW_R \quad (2)$$

$$T = 28.35 \text{ kg} * 2.0 \text{ kg}$$

$$T = 56.7 \text{ kg}$$

Para determinar el empuje de cada motor, se emplea la ecuación (3).

$$Tm = \frac{T}{N^{\circ} \text{motores}} \quad (3)$$

$$Tm = \frac{56.7}{4}$$

$$Tm = 14.175 \text{ kg}$$

### 3.7 Motor seleccionado

El motor requerido para el empuje determinado es de 14.175 kg. Es el motor agrícola de la marca T-MOTOR P80 III KV 120. Es un motor sin escobillas, impermeable, a prueba de polvo y con bobina anticorrosión. Además, tiene bajo nivel de ruido y es resistente al impacto. Tiene una capacidad de carga útil de 15 kg y un empuje máximo de 17 kg. Para su funcionamiento, se necesita una batería de 16 Ah, con un tiempo de vuelo de 15 minutos. La Figura 22 presenta el motor seleccionado [31].

*Figura 22 Motor P 80 KV 120 [31].*



La Tabla 18 presenta las especificaciones del motor P80 KV 120.

*Tabla 18 Especificaciones del Motor P80 KV 120 [31].*

<b>RPM por voltio</b>	KV 120	<b>Peso</b>	649 g
<b>Dimensiones</b>	91.6*43 mm	<b>Corriente pico (180s)</b>	70 A
<b>Potencia máxima</b>	3600 W	<b>Voltaje nominal</b>	6-12 S

### 3.8 Hélices

Basado en las características del motor seleccionado, se determinó las hélices adecuadas de la marca T-Motor MF2815R de 28 pulgadas, con un empuje máximo de 15 kg. Están hechas de polímero y fibra de carbono, lo que les otorga un peso ligero, una densidad duradera, resistencia a la abrasión, aislación térmica de los rayos ultravioleta y resistencia a altas temperaturas. La Figura 23 presenta las hélices seleccionadas [32].

**Figura 23 Hélices MF2815R [32].**



La Tabla 19 presenta las características principales de las Hélices MF2815R.

**Tabla 19 Especificaciones de las Hélices MF2815R [32].**

<b>Peso</b>	164 g	<b>Dimensiones</b>	355*145*58 mm
<b>Diámetro</b>	28.4 inch	<b>Paso</b>	10.1 inch
<b>Rango de velocidad óptima</b>	2200-3000 RPM	<b>Velocidad máxima</b>	5000 RPM
<b>Temperatura ambiente</b>	-40°C 65°C	<b>Empuje máximo</b>	15 kg

### 3.9 Controlador de velocidad

Para poder controlar el motor, se necesita un controlador de velocidad (ESC). Para esto, es necesario determinar el rango de potencia en el que va a operar, así como la corriente máxima. Se debe tener en cuenta que el amperaje máximo del controlador debe ser mayor que el del sistema motor-hélice [33].

Para determinar la potencia mínima, se empleó la ecuación (4), la cual multiplica el 20% de los amperios extras por el amperaje máximo del motor, que es de 65 A al 100%.

$$P_{min} = 1.2 * A_{maxmotor} \quad (4)$$

$$P_{min} = 78 A$$

Para la potencia máxima, se emplea la ecuación (5), la cual multiplica el 50% del amperaje máximo del motor.

$$P_{max} = 1.5 * A_{maxmotor} \quad (5)$$

$$P_{max} = 97.5 A$$

La Figura 24 presenta el controlador de velocidad (ESC) seleccionado, que tiene una capacidad de 100 A 6S.

*Figura 24 ESC DE 100 A 6S [33].*



En la Tabla 20 se presentan las características principales del controlador de velocidad (ESC) seleccionado.

*Tabla 20 Especificaciones del ESC.*

<b>Ficha técnica</b>	<b>Datos</b>
Dimensiones	72.2*30.6*17.3 mm
Corriente continua	100 A
Corriente Pico	120 A
LiPo	4-8 S
Peso	78.5 g

### **3.10 Batería**

La mayoría de las baterías de litio tienen una composición de múltiples celdas, con voltajes nominales de 3.7 V. Además, es necesario tomar en cuenta que el controlador de velocidad soporta un voltaje de 22.2 V [34].

Para determinar el número de celdas de la batería, se emplea la ecuación (6) y para calcular la capacidad total de la batería, se emplea la ecuación (7).

$$Nc = \frac{\text{Soporte de voltaje ESC}}{\text{voltaje nominal batería}} \quad (6)$$

$$Nc = 6 \text{ celdas}$$

$$Cb = \frac{\text{Tiempo de vuelo} * \text{amperaje máximo del motor}}{60} \quad (7)$$

$$Cb = 16 \text{ Ah}$$

La Figura 25 presenta la batería seleccionada con 6 celdas (S) y una capacidad mínima de 16 amperios por hora, de la marca Diamond Foxtech.

**Figura 25** Batería Diamond Foxtech 16 Ah 6S [34].



En la Tabla 21 se presenta las características principales de la batería Diamond Foxtech.

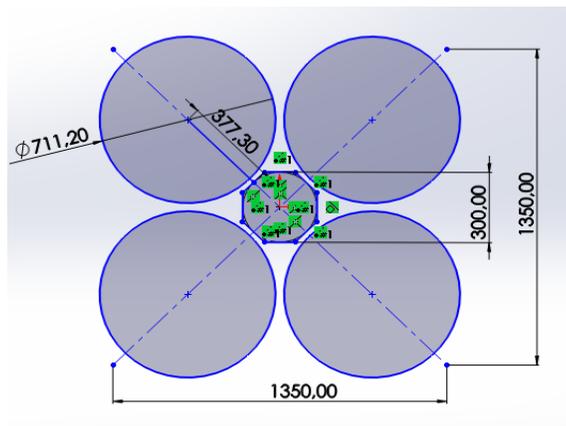
**Tabla 21** Especificaciones de la batería Diamond Foxtech.

Ficha técnica	Datos
Dimensiones	195*75*50 mm
Tensión	22.2 V
Capacidad	16 Ah
Configuración	6 S
Peso	1.5 Kg
Energía	355.2 Wh

### 3.11 Diseño de brazos

Se determinó la longitud para los brazos del dron utilizando el software SolidWorks, Se tomó en cuenta las dimensiones y longitudes de la Figura 26.

**Figura 26** Croquis preliminar del dron.



Se determinó la longitud total de los brazos del dron con una medida de 380 milímetros. Se dejó una distancia de seguridad de 30 milímetros entre los diámetros de giro para evitar colisiones. Por cada lado se obtuvo una longitud de 1350 milímetros. Para determinar el área total del dron, se emplea la ecuación (8).

$$At = l * l \quad (8)$$

$$At = 1.823 \text{ m}^2$$

### 3.12 Momento flector

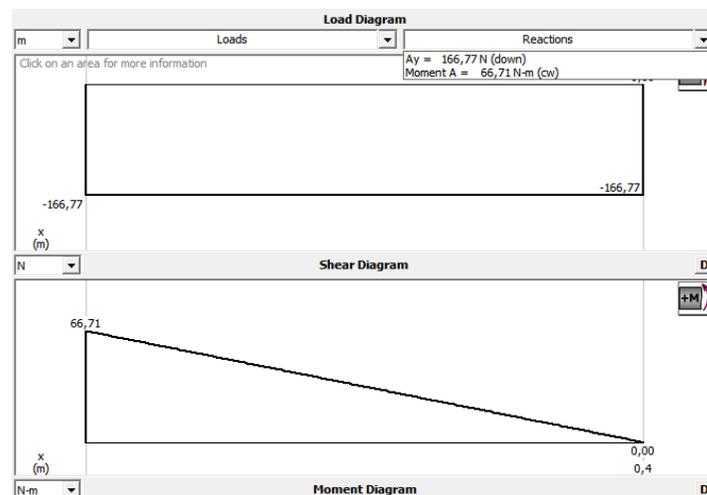
Estos brazos se analizaron para soportar la carga de un tanque de ocho litros de capacidad, con el torque máximo generado por los motores. Se determinó el momento flector máximo, con una longitud de 400 milímetros. La Figura 27 presenta el análisis estático de la viga empotrada, realizado con el software MD Solids.

Figura 27 Diagrama de cuerpo libre del brazo.



La Figura 28 presenta el resultado del momento flector máximo obtenido de 66.71 N-m, a una fuerza máxima de empuje de 166.77 N.

Figura 28 Resultados determinados por el MD SOLIDS.



### 3.13 Cálculo del brazo

Se seleccionó una configuración tubular para el diseño del brazo, debido a la capacidad para soportar cargas de flexión y facilidad de construcción. La fibra de carbono seleccionada tiene un esfuerzo de fluencia de 1830 Mpa. Para calcular el módulo de la sección con el momento máximo de la viga, se emplea la ecuación (9).

$$S = \frac{M_{max}}{0.6 * S_y} \quad (9)$$

$$S = 0.060756 \text{ cm}^3$$

Con el módulo de sección, se eligió una viga adecuada para el dron. Sin embargo, dado que el valor del módulo obtenido es pequeño y no se comercializan vigas con estas especificaciones, se seleccionó una viga con un diámetro externo de 25 milímetros e interno de 23.5 milímetros [35]. Para determinar el momento de inercia de un tubo tubular, se emplea la ecuación (10).

$$I = \frac{\pi * (d^4 - d_i^4)}{64} \quad (10)$$

$$I = 4204.0860 \text{ mm}^4$$

A partir del momento de inercia, se determina el esfuerzo normal máximo, con un centro de masa de 12.5 milímetros. Para calcular el esfuerzo normal máximo con el momento máximo de la viga, se emplea la ecuación (11).

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} * C}{I} \quad (11)$$

$$\sigma_{max} = 198.3480 \text{ MPa}$$

Para determinar el factor de seguridad de la viga, se emplea la ecuación (12).

$$f_s = \frac{0.6 * S_y}{\sigma_{max}} \quad (12)$$

$$f_s = 5.54$$

La viga seleccionada cumple con los criterios, al obtener un factor de seguridad de 5. Por lo tanto, la viga es segura para el diseño del dron.

### 3.14 Análisis estático

En este análisis se utiliza el software SolidWorks para analizar los brazos, estructura y soportes. Para los soportes, se aplicó el peso total del dron sobredimensionado de 40.5 kg y se dividió entre los cuatros soportes implementados, el cual representa una fuerza de 100 N. Se utilizó la fibra de carbono (UHM) como material y las propiedades mecánicas se detallan en la Tabla 22.

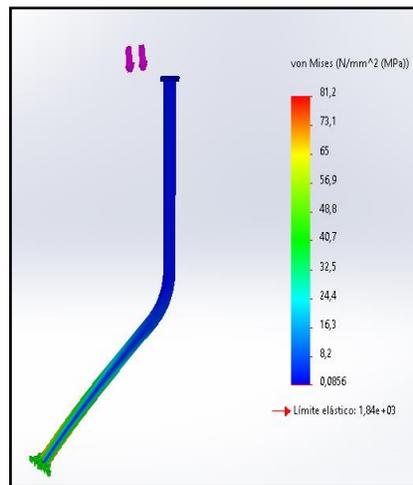
**Tabla 22** Propiedades físicas del UHM.

Propiedad	Valor
Módulo elástico	830000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.2
Módulo cortante	370000 N/mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	2160 kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	2400 N/mm <sup>2</sup>
Límite de compresión	5200 N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	1840 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente térmico	0.1 /K
Conductividad térmica	200 W/(m*K)
Calor específico	715 J/(kg*K)

- **Tensiones Von mises Pieza Soporte**

Se analizó con una fuerza de 100 N y en una escala de deformación de 82.092. Como resultado, se obtuvo una tensión máxima de 81.2 Mpa, la cual está por debajo del límite elástico de 1840 Mpa, tal como se aprecia en la Figura 29.

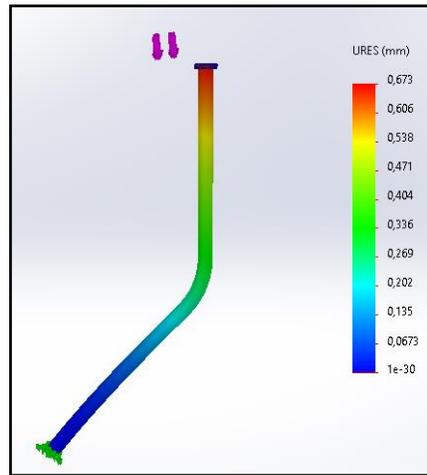
**Figura 29** Análisis nodal de tensiones Von Mises en el soporte.



- **Desplazamiento estático del soporte**

El análisis dio como resultado un desplazamiento máximo de 0.673 mm y un mínimo de 1e-30, tal como se aprecia en la Figura 30.

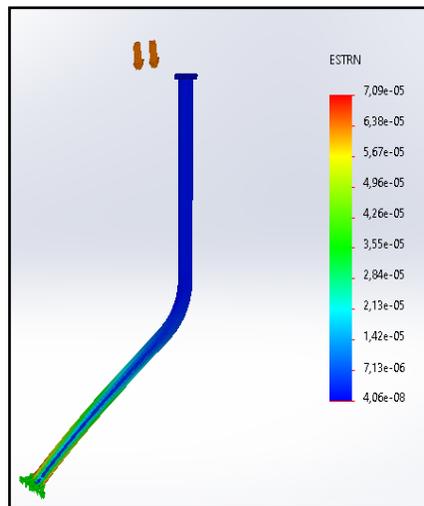
*Figura 30 Desplazamiento estático del soporte.*



- **Deformaciones unitarias del soporte**

La Figura 31 presenta los resultados estáticos con una deformación máxima de  $7.09e-05$  y un mínimo de  $4.06e-08$ .

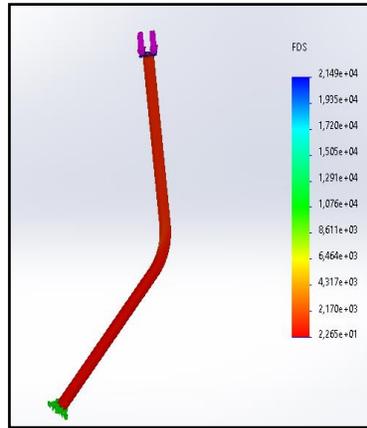
*Figura 31 Deformación del soporte.*



- **Factor de seguridad en el soporte**

La Figura 32 muestra un factor de seguridad (FDS) mínimo de  $2.265e+01$ , lo cual indica un diseño seguro del soporte.

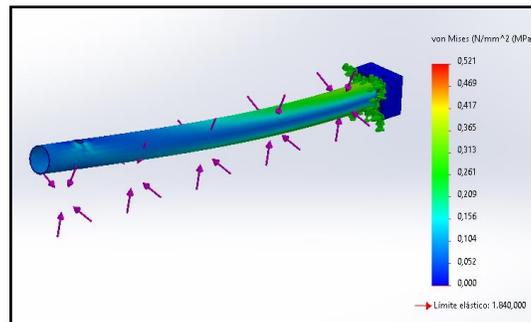
Figura 32 FDS del soporte.



- **Tensiones Von mises del brazo**

El análisis estático utilizó la fuerza de empuje máxima del motor 166.77 N, con una escala de deformación de 20.328. La Figura 33 muestra los resultados con una tensión máxima de 0.521 Mpa, por debajo del límite elástico del material UHM seleccionado.

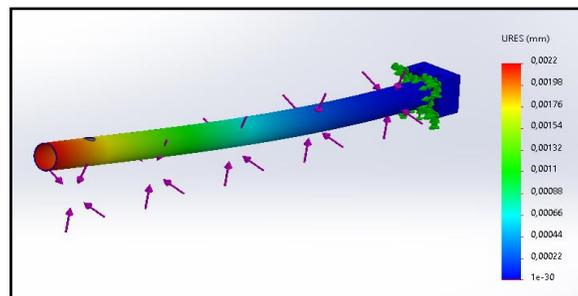
Figura 33 Análisis nodal Von Mises.



- **Desplazamiento estático del brazo**

El análisis de desplazamientos arrojó un desplazamiento máximo de 0.0022 mm y un mínimo de 1e-30, como se aprecia en la Figura 34.

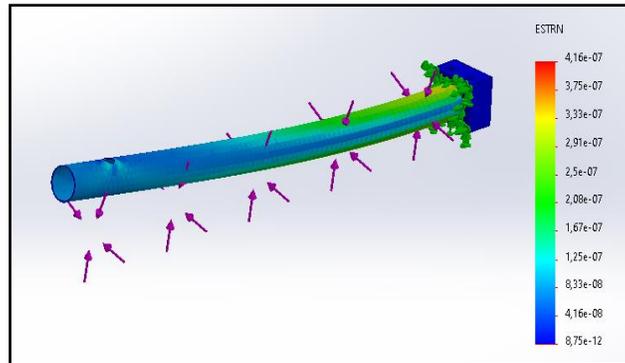
Figura 34 Desplazamiento estático del brazo.



- **Deformaciones unitarias del brazo**

La Figura 35 presenta el análisis de deformaciones unitarias, donde se observa una deformación máxima de  $4.16e-07$  y un mínimo de  $8.75e-12$ .

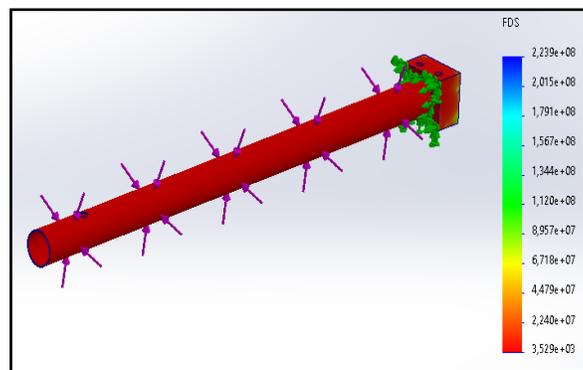
*Figura 35 Deformación unitaria del brazo.*



- **Factor de seguridad del brazo**

La Figura 36 muestra un factor de seguridad (FDS) mínimo de  $3.5e+03$ , lo que indica un diseño seguro del brazo.

*Figura 36 FDS del brazo.*



### 3.15 Tensiones Von mises de la estructura

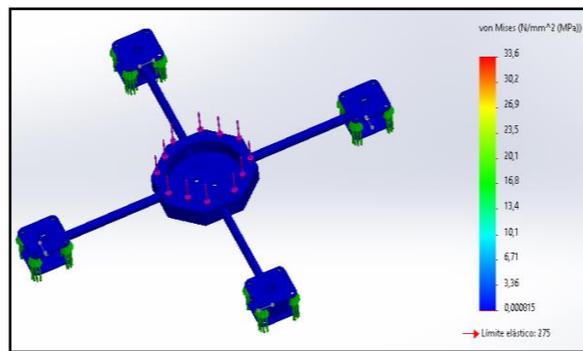
El análisis estático utilizó el peso total calculado al que estará sometido el dron, lo cual representa una fuerza de 220 N. Se utilizó aluminio aeroespacial 6061-T6 como material en el análisis. Las propiedades mecánicas del material se detallan en la Tabla 23.

**Tabla 23** Propiedades físicas del Aluminio aeroespacial 6061-T6.

Propiedad	Valor
Módulo elástico	69000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.33
Factor de endurecimiento	0.85
Densidad de masa	2700 kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	310 N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	275 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente térmico	2.4e-05 /K

Resultó en una escala de deformación de 90.98, con una máxima tensión de 33.6 Mpa, por debajo del límite elástico del material seleccionado. La Figura 37 representa los resultados obtenidos.

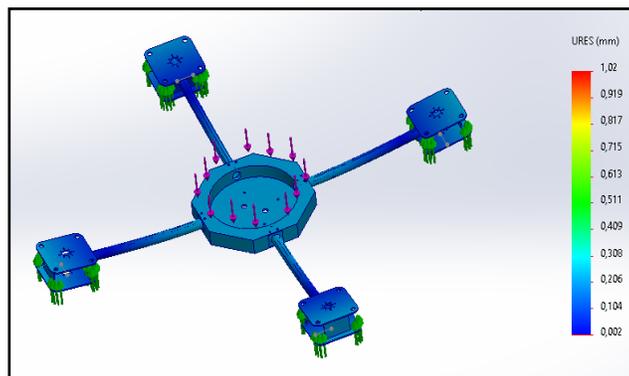
**Figura 37** Análisis nodal de tensiones Von Mises estructura.



### 3.16 Desplazamiento estático estructura

La Figura 38 presenta los resultados del análisis, con un desplazamiento máximo de 1.02 mm y un mínimo de 0.002 mm.

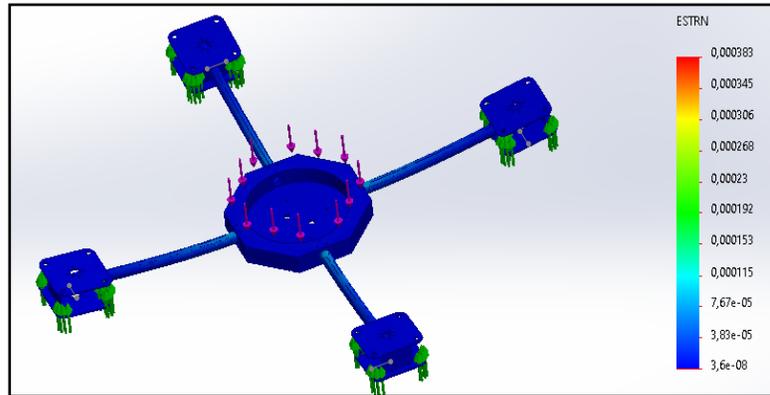
**Figura 38** Desplazamiento estático de la estructura.



### 3.17 Deformaciones unitarias en la estructura

La Figura 39 muestra los resultados del análisis, con una deformación máxima de 0.000383 y un mínimo de  $3.6 \times 10^{-8}$ .

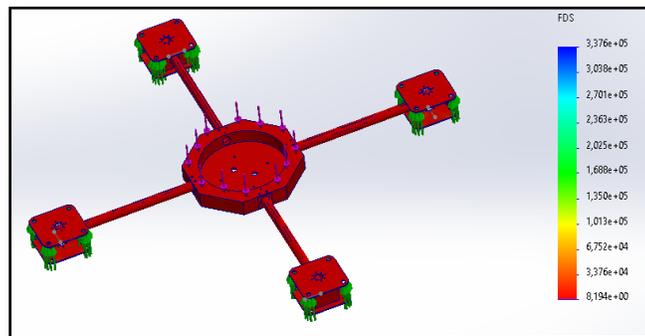
*Figura 39 Deformación de la estructura.*



### 3.18 Factor de seguridad de la estructura

La Figura 40 muestra el factor de seguridad (FDS) con un mínimo de 8.2, lo cual indica que la estructura es segura.

*Figura 40 Factor de seguridad estructura.*



### 3.19 Cálculo del empuje mínimo para los motores a la densidad del aire de Quito

Para determinar la fuerza de empuje mínima en los motores, se calcula el área efectiva de empuje, la densidad del aire en la ubicación de trabajo y la altura máxima de vuelo.

Para calcular el área efectiva, se emplea los datos de la Tabla 24 y la ecuación (13).

**Tabla 24** Constantes para el cálculo del empuje mínimo.

Datos	Valor
Distancia entre motores ( $dm - m$ )	0.74571 m
Radio de la hélice ( $r_p$ )	0.3556 m
Velocidad angular ( $w$ )	12.566 rad/s
Densidad del aire al nivel del mar ( $\rho_0$ )	1.225 kg/m <sup>3</sup>

$$A_{eff} = \frac{1}{2} * (dm - m)^2 + 3 * \pi * r_p^2 \quad (13)$$

$$A_{eff} = 1.4698m^2$$

La potencia de un motor se ve influenciada por la altitud, por lo tanto, se requiere una mayor potencia a mayores altitudes. En el caso específico del distrito metropolitano de Quito la altitud es de 2.578 metros sobre el nivel del mar [11]. Para el cálculo de la altura máxima de vuelo, se emplea la ecuación (14), donde se consideró una altura de vuelo del dron de 2 metros.

$$h = h_{m.s.n.m} + h_{dron} \quad (14)$$

$$h = 2580 \text{ m. s. n. m}$$

Para determinar la densidad del aire en el distrito metropolitano de Quito, a la altura máxima de vuelo, se emplea la ecuación (15) y los datos de la Tabla 24.

$$\rho = \rho_0 * \left(1 - \frac{6,5*10^{-3}*h}{288,15}\right)^{4,252} \quad (15)$$

$$\rho = 0.949 \frac{kg}{m^3}$$

Para calcular la velocidad lineal, se emplea la ecuación (16) junto con los datos de la Tabla 24, donde se utiliza la velocidad angular del motor y el radio de la hélice seleccionada.

$$Vr = \omega * r_p \quad (16)$$

$$Vr = 4.4685 \frac{m}{s}$$

Para determinar la fuerza de empuje mínima en los motores, se emplea la ecuación (17).

$$T = \rho * A_{eff} * Vr^2 \quad (17)$$

$$T = 28 \text{ N}$$

Se obtuvo una fuerza de empuje mínima de 28 N por cada motor, lo que implica un mínimo de 112 N por cada dos metros que se eleva.

### 3.20 Cálculo de Velocidad (Horizontal/Vertical)

Para determinar la velocidad horizontal y vertical, se utilizó la masa del dron de 28.35 kg, el área efectiva de empuje y la densidad del aire calculada.

Para determinar la velocidad vertical a la que volará el dron fumigador, se emplea la ecuación (18).

$$Vv = \sqrt{\frac{2 * M * 9.81}{\rho * 3 * A_{eff}}} * \sqrt{2 - 1} \quad (18)$$

$$Vv = 11.53 \frac{m}{s} \approx 42 \frac{km}{h}$$

Para determinar la velocidad horizontal del dron fumigador, se emplea la ecuación (19).

$$Vh = \sqrt[4]{1 - \frac{1}{4}} * \sqrt{\frac{2 * M * 9.81}{\rho * Cd * A_{eff}}} * 2 \quad (19)$$

$$Vh = 21.46 \frac{m}{s} \approx 77 \frac{km}{h}$$

Se obtuvo una velocidad vertical máxima de 42 kilómetros por hora y una velocidad horizontal máxima de 77 kilómetros por hora, lo cual proporciona un amplio rango de velocidad operativa. Es importante tener en cuenta que pueden existir variaciones por factores externos, como perturbaciones en la velocidad del viento.

### 3.21 Tiempo de vuelo y distancia recorrida

Para determinar el tiempo de vuelo, se utilizó el amperaje total de la batería de 16 Ah. También se incluyó el consumo de corriente del motor al 100%, que es de 65 Ah y el consumo al 76 %, que es de 34 Ah [31]. Para determinar el tiempo de vuelo teórico al 100% y 76% de operación, se emplea la ecuación (20).

$$T_{vuelo} = \frac{AB}{Consumo\ motores} * 60\ min \quad (20)$$

$$T_{vuelo(100\%)} = 15\ min$$

$$T_{vuelo(76\%)} = 28\ min$$

Para determinar el tiempo de vuelo real al 100% y 76% de operación, se emplea la ecuación (21), con una eficiencia del 78%.

$$T_{vuelo\ real} = T_{vuelo} * 78\% \quad (21)$$

$$T_{real(100\%)} = 12\ min$$

$$T_{real(76\%)} = 22\ min$$

Se obtuvo un tiempo de vuelo real de 12 minutos al 100% de operación y 22 minutos al 76% de operación. Por lo general, los motores seleccionados trabajan al 76% de operación, lo que les brinda una mayor eficiencia.

- **Distancia recorrida**

Para determinar la distancia recorrida, se emplea la ecuación (22), utilizando la velocidad horizontal y el tiempo real de consumo de la batería al 76% de operación.

$$x = V_h * T_{real(76\%)} \quad (22)$$

$$x = 28327.2\ m$$

Se obtuvo una distancia recorrida de 28.33 kilómetros dentro de un tiempo de vuelo de 22 minutos, lo que significa que el dron puede recorrer 77 kilómetros en una hora.

### 3.22 Cálculo de corriente, potencia y duración del ESC

Para determinar la corriente máxima consumida, la potencia máxima y la duración del controlador de velocidad (ESC), se utilizó la corriente máxima del motor seleccionado de 70 A y la corriente consumida por otros dispositivos electrónicos representan 2 amperios del sistema de propulsión. Para calcular la corriente máxima, se emplea la ecuación (23), para los cuatro motores.

$$I_{max} = I_{otros} + I_{motor} * N_{motores} \quad (23)$$

$$I_{max} = 282 A$$

Para calcular la corriente consumida con la carga útil durante el tiempo de vuelo real al 76% de operación, se emplea la ecuación (24).

$$I_{consumida} = I_{max} * T_{real(76\%)} \quad (24)$$

$$I_{consumida} = 103.4 Ah$$

Para calcular la potencia máxima consumida, se emplea la ecuación (25) con el voltaje de la batería de 22.2 voltios.

$$W_{max} = V_{bateria} * I_{motor} \quad (25)$$

$$W_{max} = 1554 watts$$

Para calcular la duración del controlador de velocidad (ESC), se emplea la ecuación (26) con los 22 amperios consumidos por el ESC.

$$D_{Esc} = \frac{I_{ESC}}{I_{max}} * 60 min \quad (26)$$

$$D_{ESC} = 5 min$$

Se obtuvo una corriente máxima consumida de 103 amperios por hora con la carga útil implementada y una potencia máxima consumida de 1554 vatios. La duración del controlador de velocidad es de 5 minutos por cada 282 amperios consumidos del sistema de propulsión del dron.

### 3.23 Cálculo del sistema de pulverización

Para determinar el sistema de pulverización más eficiente, se calculará la velocidad del chorro de pulverización, el diámetro de la manguera, el caudal de la boquilla, el caudal requerido, el tiempo de consumo del tanque, el volumen de roció, así como el tiempo y la distancia de fumigación por hectárea.

Para las ecuaciones del sistema de pulverización, se emplean los datos de la Tabla 25.

*Tabla 25 Constantes para el cálculo del sistema de pulverización.*

Datos	Valor
Diámetro externo ( $d_e$ )	1.6 mm
Diámetro interno ( $d_i$ )	0.25 mm
Área de la boquilla ( $A_b$ )	90 mm <sup>2</sup>
Velocidad de impulso ( $V_{im}$ )	2.64 m/s
Coefficiente de descarga ( $C_d$ )	0.82
Capacidad del tanque ( $C_t$ )	8 litros

Para calcular la velocidad del chorro de pulverización, se emplea la ecuación (27) con el diámetro externo e interno de la boquilla seleccionada del modelo XR11001 VS. Las especificaciones de la boquilla se encuentran en el Anexo 3.

$$V_{ch} = \frac{(d_e - d_i)}{2} * \sqrt{\frac{9.81}{2 * 0.5}} \quad (27)$$

$$V_{ch} = 2.1 \frac{m}{s} \approx 126 \frac{m}{min}$$

Para calcular el diámetro de la manguera, se emplea la ecuación (28).

$$D_{man} = \sqrt{A_b * \frac{V_{ch}}{V_{im}}} \quad (28)$$

$$D_{man} = 8.5 \text{ mm}$$

Para calcular el caudal de la boquilla, se emplea la ecuación (29).

$$Q_{cal} = \frac{A_b * V_{ch}}{C_d} \quad (29)$$

$$Q_{cal} = 0.014 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$$

Para calcular el caudal requerido, se emplea la ecuación (30) para las cuatro boquillas.

$$Q_{req} = Q_{cal} * N_{boquillas} \quad (30)$$

$$Q_{req} = 0.56 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$$

Para calcular el tiempo de consumo del tanque, se emplea la ecuación (31).

$$T_{tanque} = \frac{Ct}{Q_{req}} \quad (31)$$

$$T_{tanque} = 14.3 \text{ min}$$

Para calcular el volumen de roció, se emplea la ecuación (32), con la longitud de la barra de 0.4 metros.

$$V_r = \frac{60 * Q_{cal}}{L_{barra} * 1} \quad (32)$$

$$V_r = 2.1 \text{ litros por hectárea}$$

Para calcular el Tiempo de fumigación por hectárea, se emplea la ecuación (33).

$$T_f = \frac{T_{tanque} * V_r}{Ct} \quad (33)$$

$$T_f = 3.8 \approx 4 \text{ min por hectárea}$$

Para calcular la distancia de fumigación, se emplea la ecuación (34).

$$D_f = \frac{Ct}{V_r} \quad (34)$$

$$D_f = 3.8 \text{ hectáreas}$$

Se obtuvo una velocidad de pulverización de 2 metros por segundo, con un diámetro de manguera de 8.5 milímetros. El tiempo de consumo del tanque a esta velocidad es de 14 minutos. El tiempo de fumigación por hectárea es de 4 minutos, con un volumen de roció de 2 litros. Con un tanque de ocho litros de capacidad, se puede fumigar un área de 3.8 hectáreas.

## CAPÍTULO 4

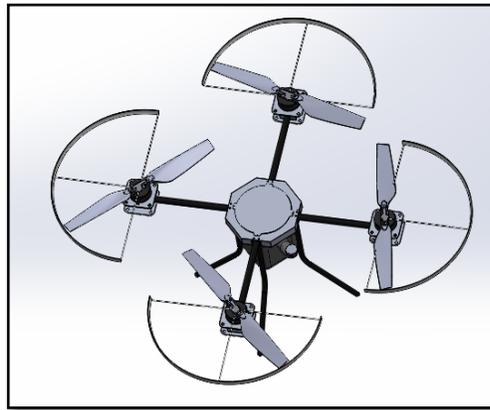
### RESULTADOS

En este capítulo se presentan las simulaciones realizadas al diseño previamente definido y los resultados obtenidos.

#### 4.1 Dron diseñado en SolidWorks

Para la simulación, se diseñó el cuadricóptero en SolidWorks, el cual consta con una protección parcial en las hélices para evitar colisiones con árboles o ramas, como se puede apreciar en la Figura 41.

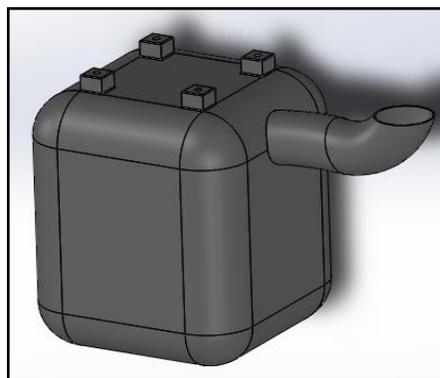
*Figura 41 Dron cuadricóptero.*



- **Diseño del tanque**

La Figura 42 muestra el diseño del tanque para ocho litros de capacidad, creado con el software SolidWorks. El diseño resultó en un volumen de 8.29 litros con material de polímero.

*Figura 42 Tanque de ocho litros.*



## 4.2 Simulación del análisis aerodinámico

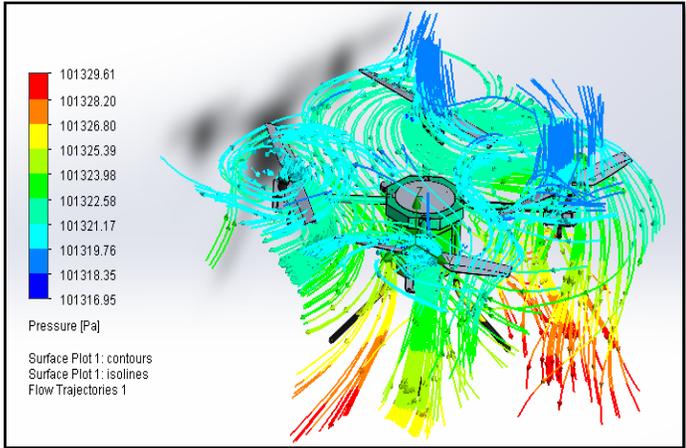
Mediante Flow Simulation de solidworks se realiza el análisis aerodinámico del cuadricóptero diseñado, como constantes se ingresó la gravedad, el giro horario e antihorario de las hélices, el aire como gas a evaluar y la humedad relativa. La Figura 43 presenta los resultados de la simulación.

Figura 43 Análisis presión del aire.



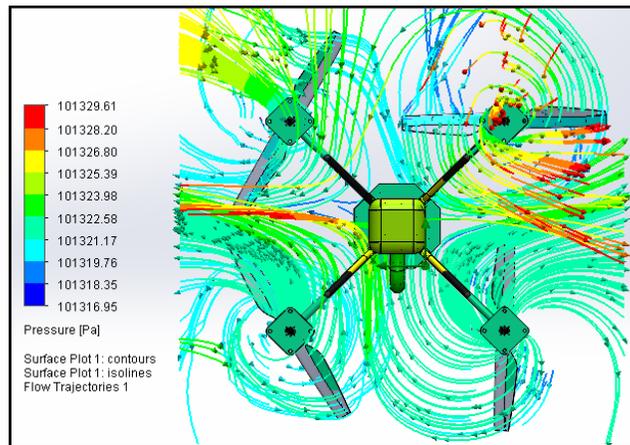
La Figura 44 presenta la simulación aerodinámica de la presión ejercida por el viento sobre el cuadricóptero.

Figura 44 Simulación aerodinámica de la presión en el cuadricóptero.



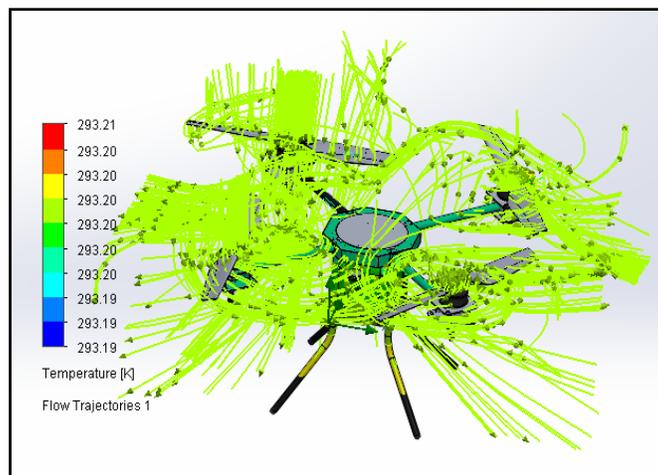
En la Figura 45 se representan las líneas de presión ejercidas por el viento en las hélices del dron, tanto cuando rota en sentido horario como en sentido antihorario.

*Figura 45 Simulación de la rotación de las hélices.*



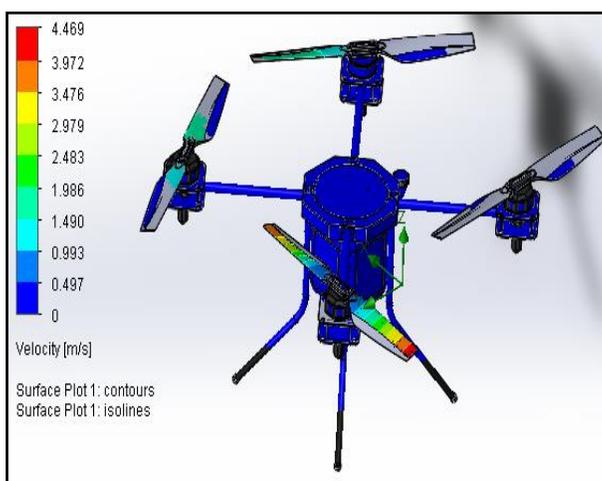
La Figura 46 muestra la temperatura de trabajo del dron a una humedad relativa del 50%. Como resultado, se obtuvo una temperatura óptima de 20 grados centígrados, que representa el clima cálido-templado al que estará sometido el dron al momento de fumigar cultivos de frutilla.

*Figura 46 Simulación de la temperatura de trabajo en el dron.*



En la Figura 47 se representa la velocidad del viento obtenida en las hélices, con un valor máximo de 5 metros por segundo. Este valor indica la velocidad promedio del viento a la que las hélices estarán expuestas en condiciones climáticas cálidas-templadas.

**Figura 47** Simulación de la velocidad del viento en las hélices.



La Tabla 26 presenta los resultados de la simulación aerodinámica del dron fumigador en condiciones climáticas cálidas y templadas.

**Tabla 26** Resultados de la simulación aerodinámica del dron.

<b>Resultados</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de trabajo	293.20 K
Velocidad en las hélices	5 m/s
Presión máxima	101329.61 Pa
Humedad relativa	50 %
Intensidad de turbulencia	0.1 %
Longitud de turbulencia	0.0122 m

### 4.3 Simulación en clima cálido y templado

Para esta simulación se utilizó el software Xcalc Copter, el cual permite simular el dron con el sistema de propulsión diseñado en diferentes tipos de climas. Este software proporciona valores estimados de la viabilidad del dron en condiciones reales. En la Figura 48 se pueden observar los parámetros ingresados en el software [36].

Figura 48 Parámetros ingresados en el software.

The screenshot shows a software interface for configuring drone parameters. The interface is divided into several sections: General, Celdas batería, Variador, Motor, and Hélice. Each section contains various input fields and dropdown menus. Below the configuration fields, there are six circular gauges displaying real-time or calculated values: Carga (15.0), Tiempo de vuelo estacionario (5.0), Potencia eléctrica (1370), Temperatura ext. (51), Empuje-Peso (1.4), and Empuje específico (5.49). A 'Calcular' button is located at the bottom right of the configuration area.

En la Figura 49 se presentan los resultados arrojados por el software, donde se obtuvo una eficiencia óptima del 86.5% con el motor seleccionado. Este resultado representa la viabilidad del sistema fumigador en términos de eficiencia de propulsión.

Figura 49 Resultados obtenidos de los componentes internos del dron.

Observaciones:			
Batería	Motor a eficiencia óptima	Motor al Máximo	Motor @ Hover
Carga:	14.97 C	Corriente: 38.82 A	Corriente: 59.89 A
Voltaje:	23.02 V	Voltaje: 23.33 V	Voltaje: 22.87 V
Tensión nominal:	22.80 V	Revoluciones*:	2402 rpm
Energía:	364.8 Wh	Potencia eléctrica:	905.4 W
Capacidad total:	16000 mAh	Potencia mecánica:	783.2 W
Capacidad usada:	14400 mAh	Eficiencia:	86.5 %
Tiempo min de vuelo:	3.6 min		
tiempo medio de vuelo:	4.8 min		
Tiempo de vuelo estacionario:	5.0 min		
Peso:	2808 g		
	99 oz		
		Potencia-Peso:	249.0 W/kg
			112.9 W/lb
		Eficiencia:	85.1 %
		Temperatura ext.:	51 °C
			124 °F
		Medidas de potencia	
		Intensidad:	239.56 A
		Voltage:	23.02 V
		Potencia:	5514.7 W
			113 °F
		Empuje específico:	5.49 g/W
			0.19 oz/W

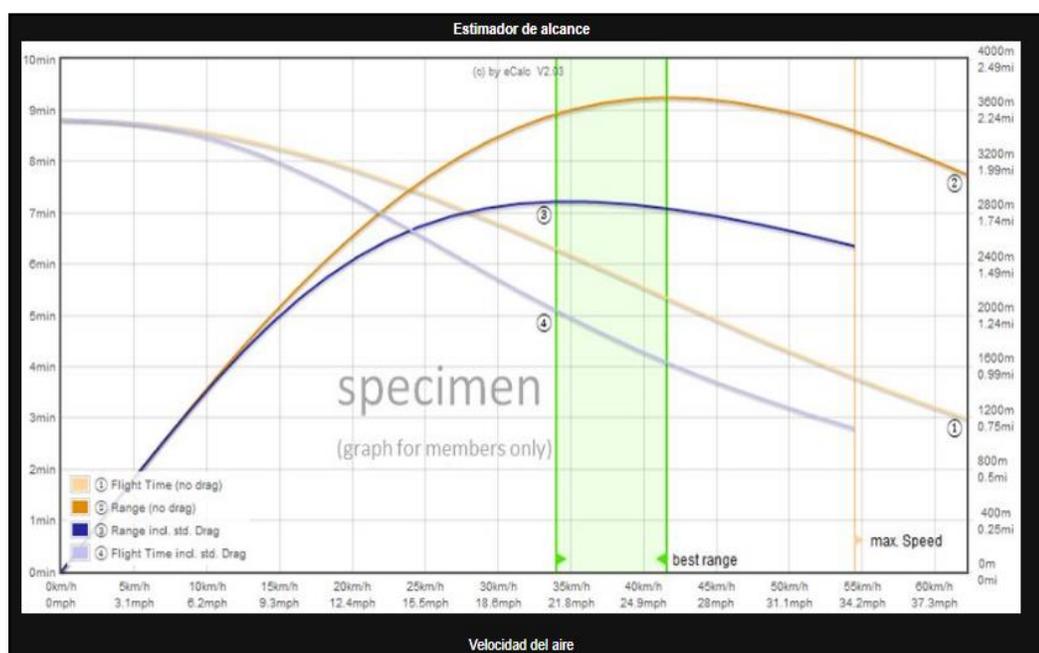
La Figura 50 presenta los detalles de la motorización evaluada. Como resultado, se determinó una inclinación máxima de 36 grados y una velocidad máxima de 30 kilómetros por hora. Estos resultados demuestran la eficiencia del dron fumigador en climas cálidos y templados.

Figura 50 Resultados obtenidos de la motorización del dron.

Motorización Total		Multicóptero	
Peso de la Motorización:	6472 g 228.3 oz	Peso total:	22000 g 776 oz
Empuje-Peso:	1.4 : 1	máximo peso adicional:	5169 g 182.3 oz
Corriente en estacionario:	172.35 A	inclinación máxima:	36 °
Pot(entrada) en estacionario:	4165.2 W	velocidad máxima:	30 km/h 18.6 mph
Pot(salida) en estacionario:	3361.6 W	Rango estimado:	- m - mi
Eficiencia en estacionario:	80.7 %	Trepada estimada :	2.0 m/s 394 ft/min
Corriente al máximo:	239.57 A	Area total del disco:	158.90 dm <sup>2</sup> 2462.95 in <sup>2</sup>
Potencia(entrada) al máximo:	5789.8 W		
Potencia(salida) al máximo:	4661.0 W		
Eficiencia al máximo:	80.5 %		

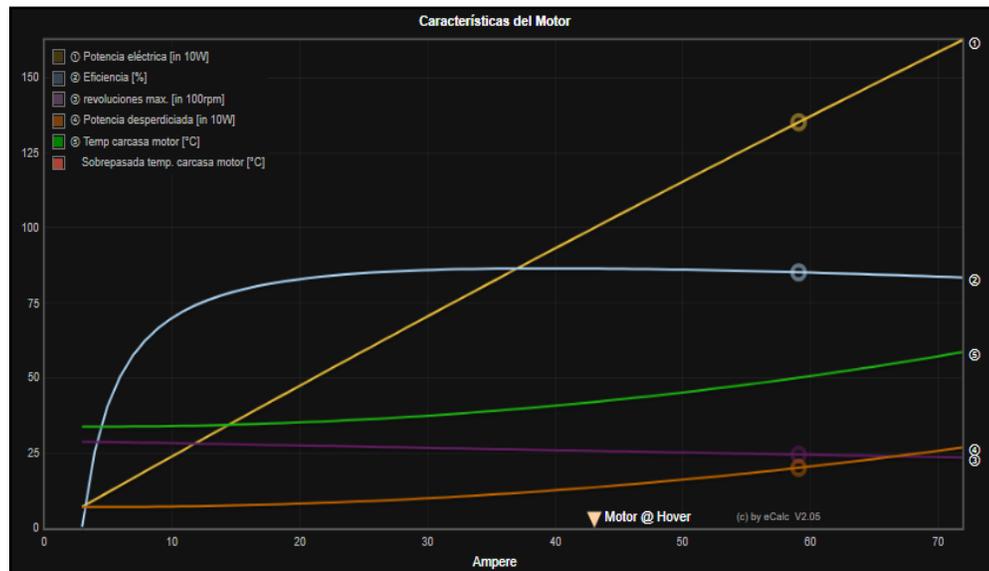
La Figura 51 presenta la gráfica obtenida del alcance recorrido en función del rango de velocidad óptimo. Esta gráfica indica que el mejor rango de velocidad para un vuelo eficiente es de 35 a 40 kilómetros por hora. Además, se observa que la velocidad máxima alcanzada por el dron, con la carga útil que lleva, es de 55 kilómetros por hora.

Figura 51 Gráfica del alcance vs velocidad.



La Figura 52 presenta los resultados del análisis en el motor. Esta gráfica muestra el rango de consumo óptimo de corriente, que está entre 40 y 50 amperios, con una eficiencia del 85%. Esto indica que se realizó una correcta selección del motor para la aplicación propuesta. El valor máximo de consumo es de 60 amperios para prevenir un sobrecalentamiento del motor.

*Figura 52 Gráfica del análisis del motor.*



#### 4.4 Simulación en la fumigación de cultivos de frutilla

Con el software Mission Planner, se realizó la simulación de las rutas de fumigación de manera precisa en los cultivos de frutilla. Este software es una plataforma automática de estación terrestre que permite planificar y controlar las operaciones de vuelo del dron para la fumigación de los cultivos [37].

Permite crear y definir rutas de vuelo, establece puntos de referencia, altitudes y velocidades. Además, ofrece funciones de monitoreo en tiempo real, control de vuelo, registro de datos y análisis de datos. Facilita la implementación de misiones autónomas utilizando una interfaz intuitiva de mapas, como Google Maps. También permite obtener y monitorear los registros generados por el estado del dron, lo que brinda información valiosa sobre la telemetría del vuelo. Para delimitar los puntos del área a fumigar, se utilizan sistemas de coordenadas espaciales, y este procedimiento se lleva a cabo en diversas fases del proceso de planificación y ejecución de la misión [37].

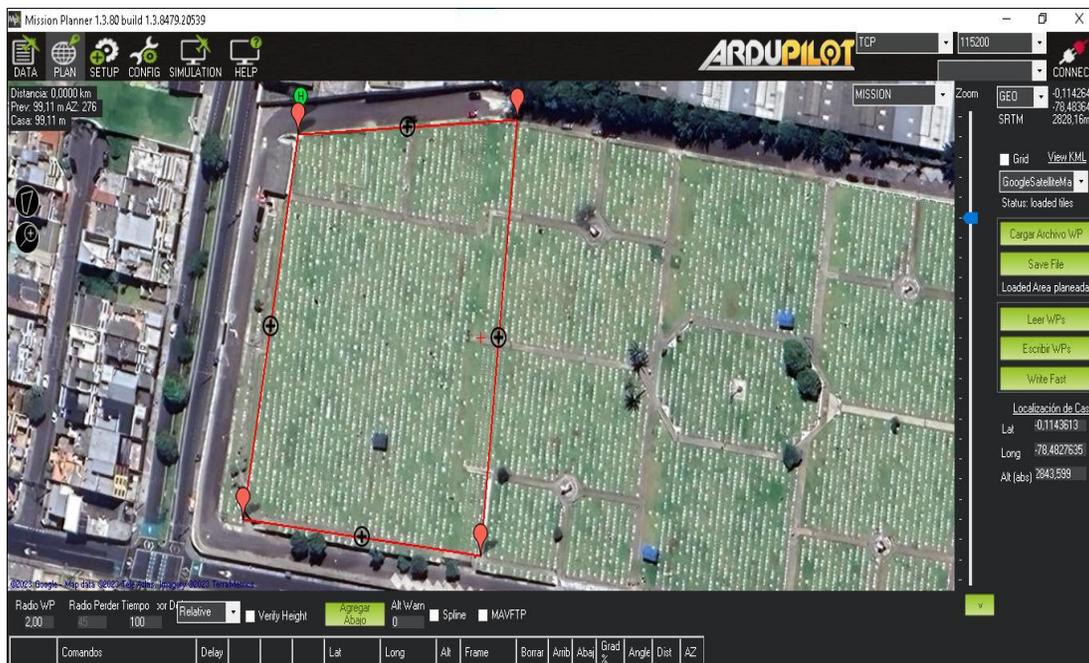
## 4.5 Delimitaciones del terreno para la partida de vuelo

La ubicación de partida implica establecer un perímetro específico para aislar el área en la cual se realizará la fumigación. Para lograr esto, se utilizan las coordenadas geográficas proporcionadas por Google Maps para obtener las ubicaciones de los vértices que delimitan dicha área. Estas coordenadas permiten establecer con precisión el contorno exacto de la zona a fumigar.

En el caso de esta simulación, se ha seleccionado un área de 10 mil metros cuadrados destinada al cultivo de frutilla, la cual se encuentra ubicada en el Distrito Metropolitano de Quito. Para delimitar esta área, se han obtenido las coordenadas geográficas de cuatro puntos utilizando Google Maps. Estos puntos representan los vértices deseados que definen el contorno de la zona de fumigación. Además, se ha establecido un punto adicional, denominado punto H, que marca tanto el punto de partida como de llegada del dron durante las operaciones de fumigación [37].

Una vez obtenidas las coordenadas, el sistema traza líneas imaginarias que conectan los puntos y forman un polígono que representa el área de cultivo. Posteriormente, se especifica la distancia y el ángulo entre las trayectorias de vuelo del dron, teniendo en cuenta la altitud a la que se realizará la fumigación. Estos parámetros son configurados de acuerdo a los requisitos y características específicas de la aplicación. La Figura 53 muestra el área de fumigación seleccionada.

*Figura 53 Área de fumigación.*



Con base en los detalles mencionados, se procede a establecer el enmallado, que consiste en trazar líneas imaginarias con una distancia de 2 metros entre ellas. Durante el vuelo, se mantendrá una velocidad uniforme de 6 metros por segundo y una altitud de ascenso de 2 metros. Sin embargo, en el punto de partida, el dron ascenderá a una altitud de 4 metros antes de comenzar a descender gradualmente hacia la misión. Como se puede apreciar en la Figura 54.

**Figura 54** Configuración de los parámetros del terreno.

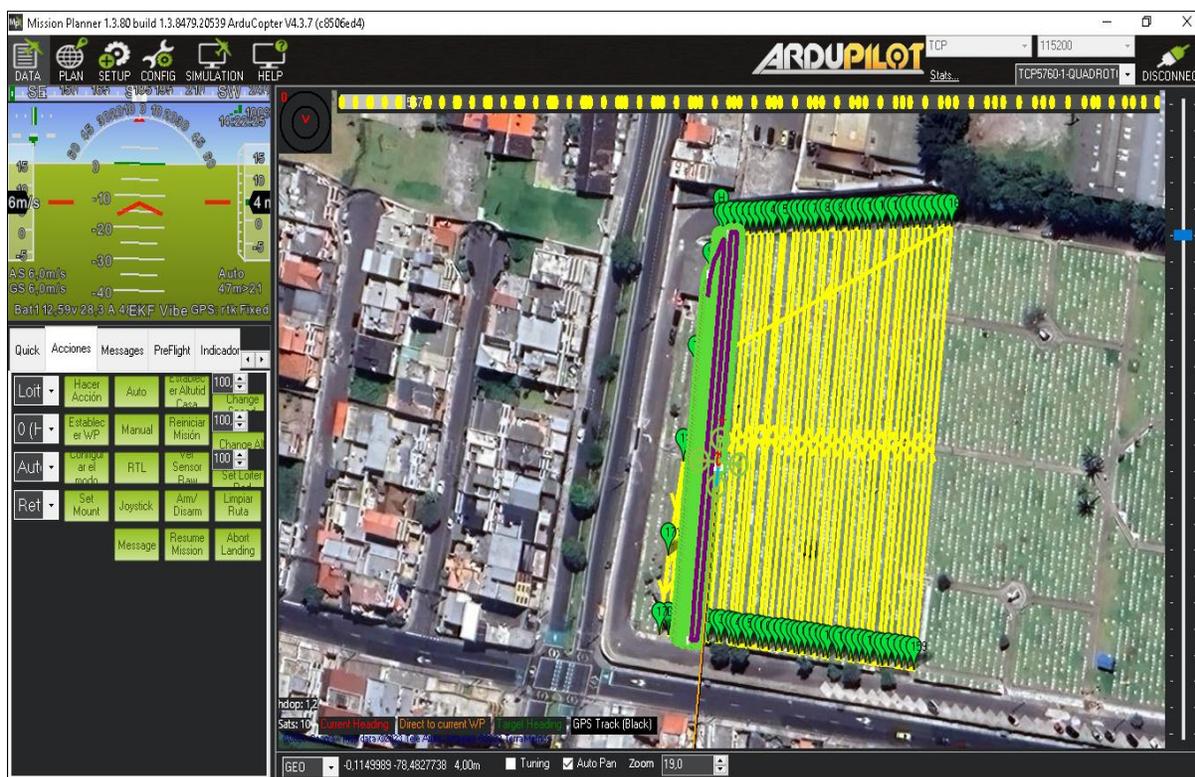


Los resultados de esta simulación, determinan un tiempo de vuelo de 18 minutos, en una distancia total de 5.27 kilómetros en un área de una hectárea. Esto implica que en una hora se puede fumigar hasta tres hectáreas.

Para esta simulación, se planteó el uso del controlador de vuelo Pixhawk Cube. Este controlador cuenta con un sistema de control automático PID que se encarga de estabilizar el dron durante el vuelo. Además, se utiliza el software ARDUPILOT para programar y configurar el controlador de vuelo, lo que permite un control eficiente del dron. El controlador de vuelo se conecta vía satélite con las coordenadas delimitadas en el software, lo que establece la ruta de vuelo más óptima [38].

La Figura 55 muestra la simulación de la fumigación del dron en la ruta establecida. Se puede apreciar la trayectoria de vuelo, los puntos de referencia y las zonas de fumigación.

Figura 55 Simulación del proceso de fumigación.



Una vez finalizado el proceso de fumigación, el dron regresa a la coordenada inicial manteniendo la altitud establecida. Es importante tener en cuenta que la eficiencia en la ejecución de la misión puede verse afectada por las condiciones climáticas externas que se presenten durante la fumigación. Sin embargo, el software proporciona una mayor flexibilidad y capacidad de maniobra para adaptarse a diferentes escenarios y llevar a cabo las distintas misiones propuestas de manera eficiente.

#### 4.6 Simulación de vuelo del dron mediante el software Coppelia Sim Edu

Para llevar a cabo la simulación del proyecto, se utilizó el software Coppelia Sim Edu. Esta elección se basó en su capacidad para importar diseños CAD y simularlos dentro del programa, lo que permitió visualizar y evaluar el comportamiento del dron en un entorno virtual. Además, el software ofreció la posibilidad de programar trayectorias precisas para la fumigación, lo que facilita la planificación y optimización de las rutas de vuelo.

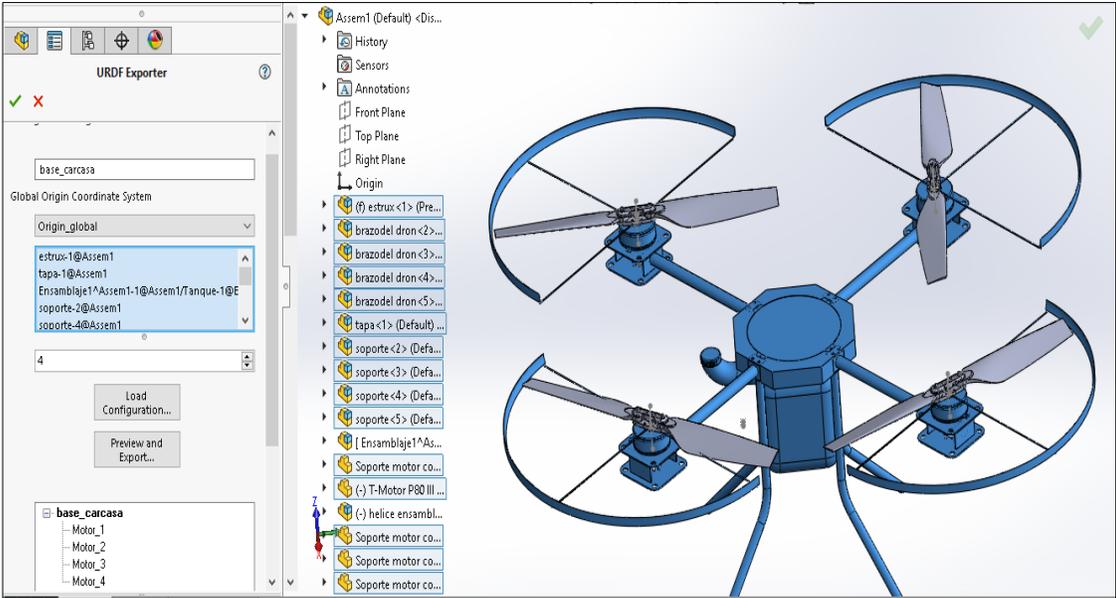
Este programa permite la simulación de sistemas robóticos de una amplia variedad, incluyendo drones, brazos robóticos y vehículos autónomos. Tiene un entorno de simulación tridimensional donde se pueden crear escenarios virtuales para evaluar el comportamiento de los sistemas robóticos. Permite el modelado y configuración intuitiva de componentes como cuerpos, sensores, actuadores y articulaciones de manera sencilla. Se puede controlar y programar el comportamiento de los sistemas robóticos utilizando diferentes tipos de lenguajes de programación. Además, permite la integración de sensores y actuadores virtuales para replicar las funcionalidades de los sistemas robóticos reales. Por último, ofrece la posibilidad de realizar análisis y visualización de los datos generados durante la simulación [40].

### 4.6.1 Exportación del dron al software Coppelia Sim

Con el software SolidWorks, se exportó el modelo del dron en formato URDF, se tuvo en cuenta las bases y las articulaciones del dron. Se establecieron los sistemas de referencia para cada componente móvil, en particular para las hélices, que realizan movimientos de rotación.

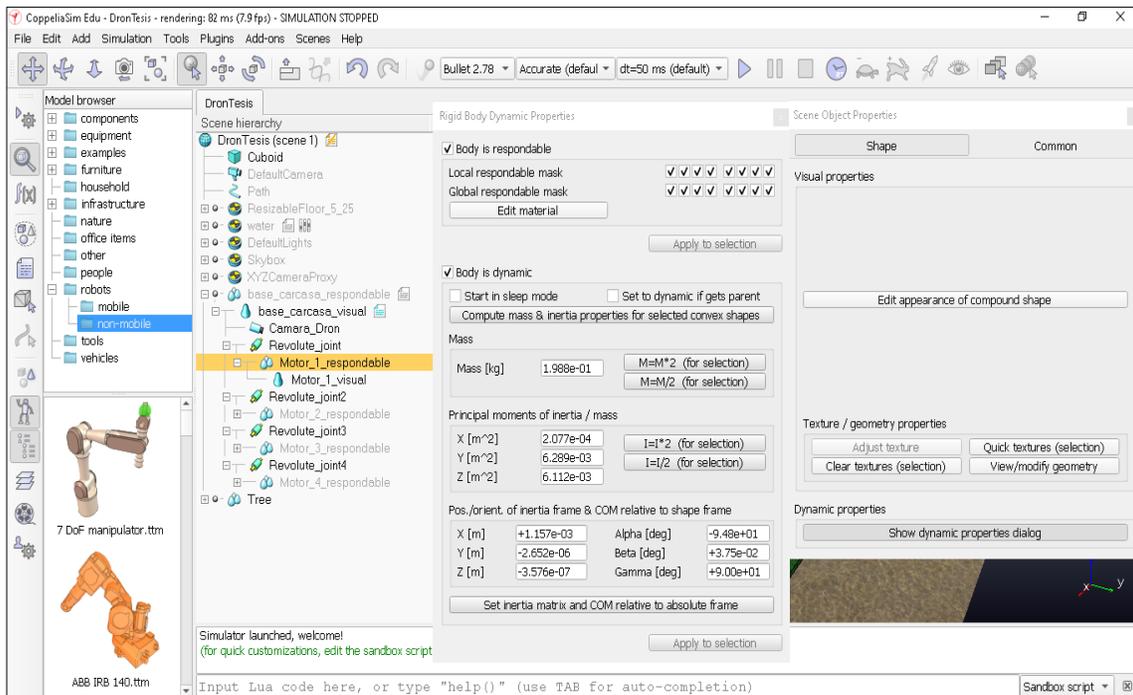
La Figura 56 muestra la exportación del dron al software Coppelia Sim.

Figura 56 Modelo 3D del dron exportado.



Una vez importado, se verifica la jerarquía de las partes del dron y se realizan las configuraciones necesarias en cada una de ellas. En la Figura 57 se muestran las configuraciones de los elementos padres e hijos, donde se establecen las relaciones jerárquicas requeridas para simular el movimiento adecuado de las hélices.

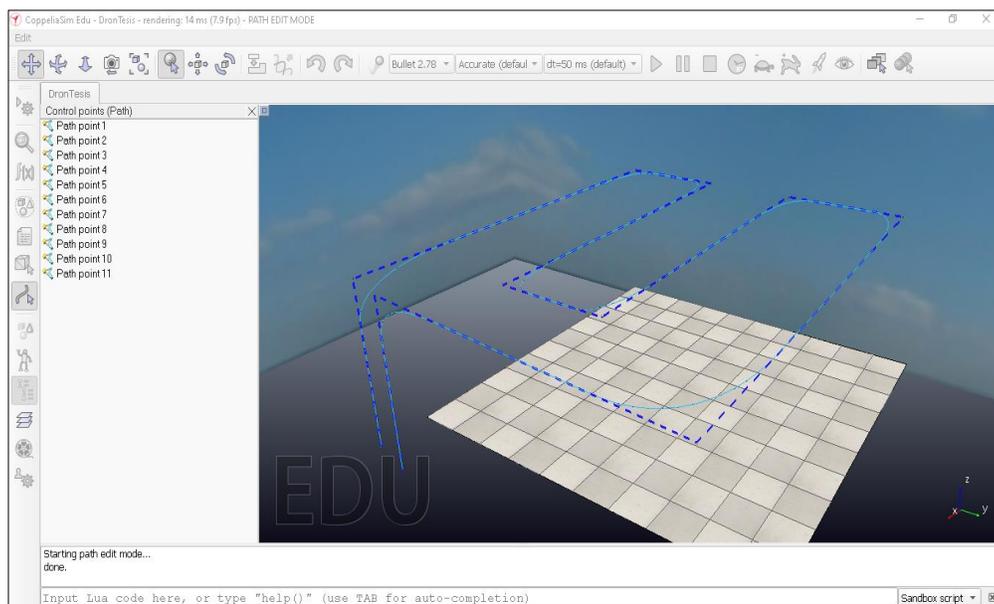
**Figura 57** Jerarquía de las partes del dron con su configuración.



#### 4.6.2 Delimitación de la ruta del dron

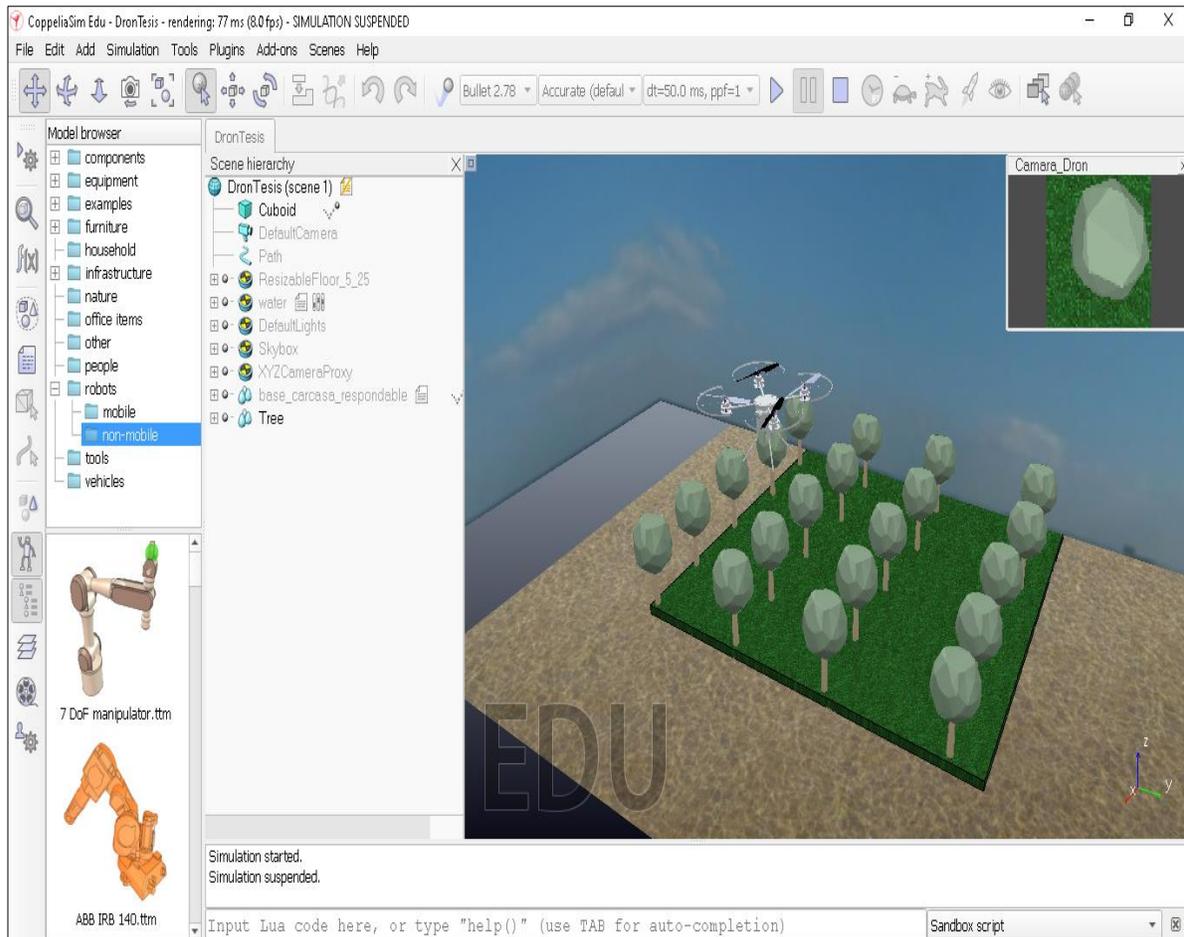
Para la creación de la ruta, se utiliza el software Coppelia Sim. Se establece una ruta de vuelo similar a la creada en el software Misión Planner, pero en este caso con un área reducida de 25 metros cuadrados. Se define el punto de partida y los puntos a los que el dron debe desplazarse para completar la ruta establecida. La Figura 58 muestra la ruta establecida para la simulación.

**Figura 58** Ruta de vuelo establecida para el dron.



Después de establecer la ruta, se realizó las configuraciones necesarias y se programó el dron con el lenguaje de programación Lua, para que cumpla con la ruta de fumigación establecida. La Figura 59 presenta el vuelo simulado del dron siguiendo la ruta establecida.

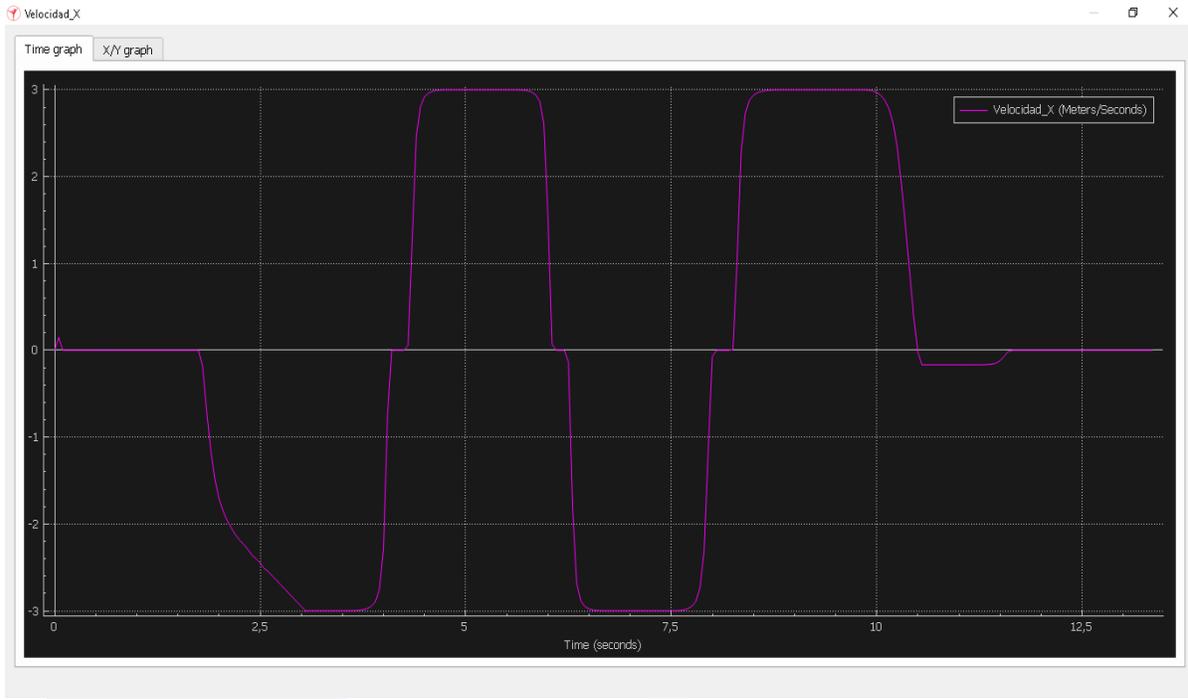
*Figura 59 Simulación del vuelo del dron en la ruta establecida.*



### 4.6.3 Resultados obtenidos por la simulación

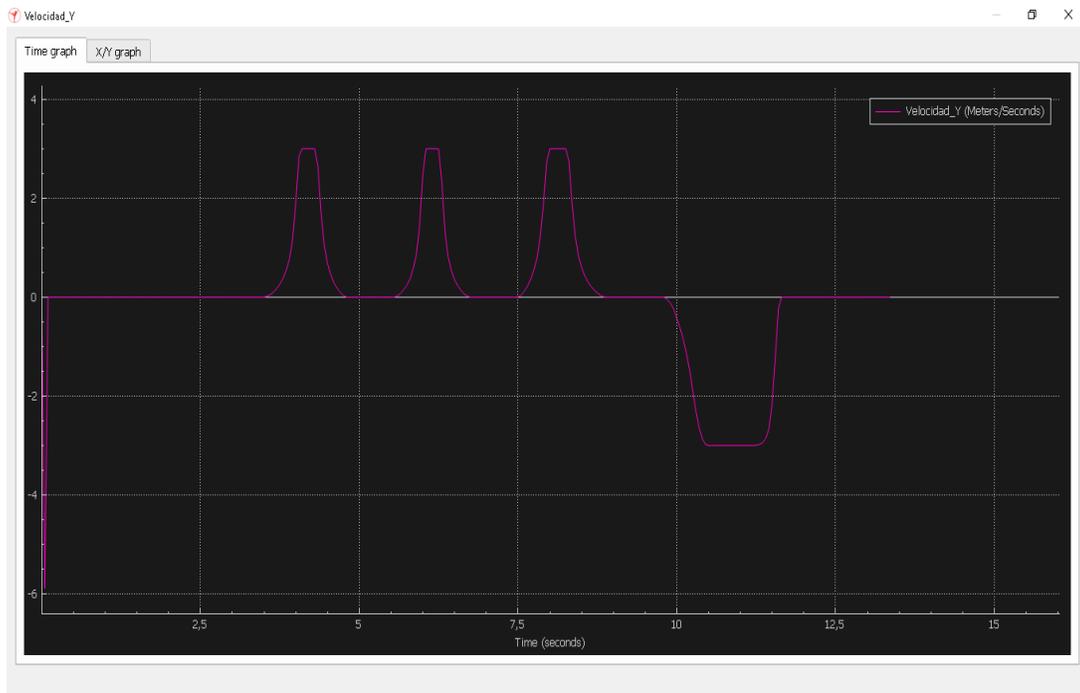
Como primer resultado, se presentan las gráficas de velocidad en los ejes X, Y, y Z. Estas gráficas fueron generadas utilizando el software Coppelia Sim Edu. En la Figura 60 se muestra la gráfica de velocidad en el eje X. La velocidad positiva indica que el dron se está trasladando en la dirección positiva al eje según la referencia establecida, mientras que una velocidad negativa indica un desplazamiento en sentido contrario al eje X.

**Figura 60** Gráfica de velocidad del eje X.



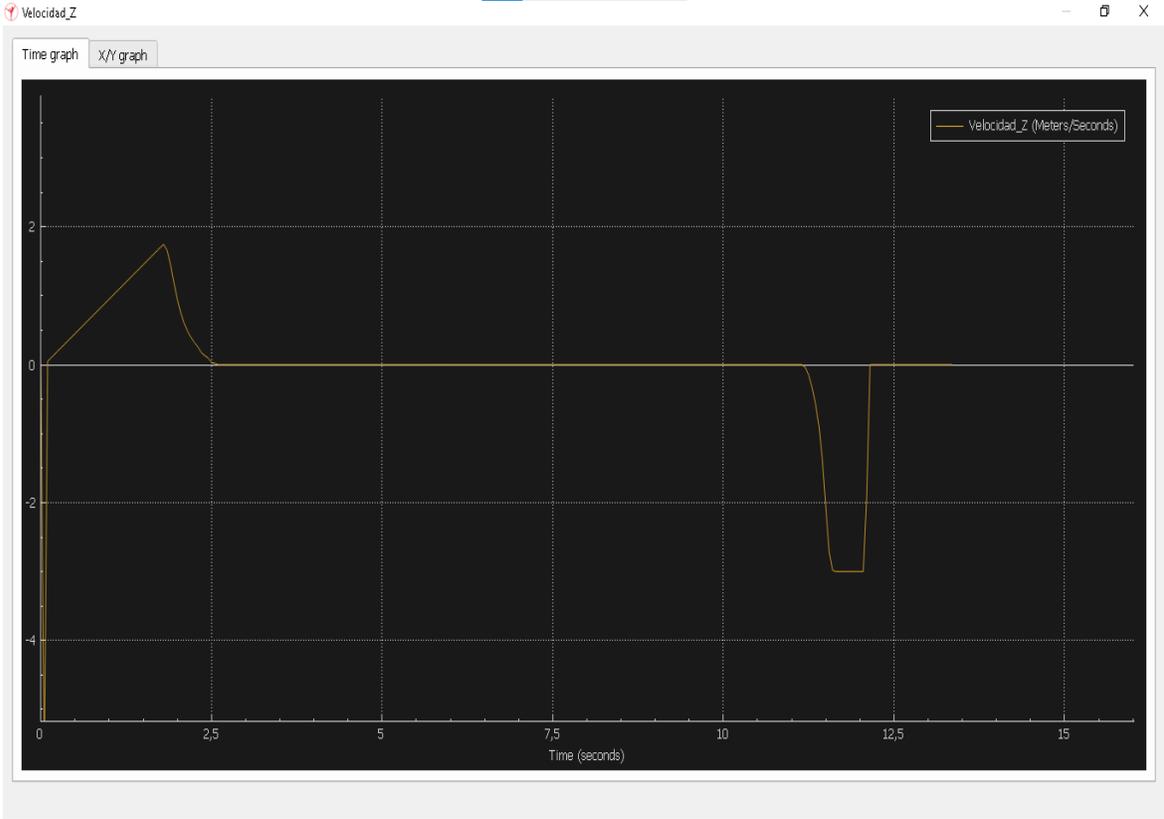
En la Figura 61 se muestra la gráfica de velocidad en el eje Y. Esta gráfica representa la velocidad del dron en la dirección del eje Y, donde una velocidad positiva indica un movimiento hacia arriba o en la dirección positiva del eje, y una velocidad negativa indica un movimiento hacia abajo o en la dirección negativa del eje.

**Figura 61** Gráfica de velocidad del eje Y.



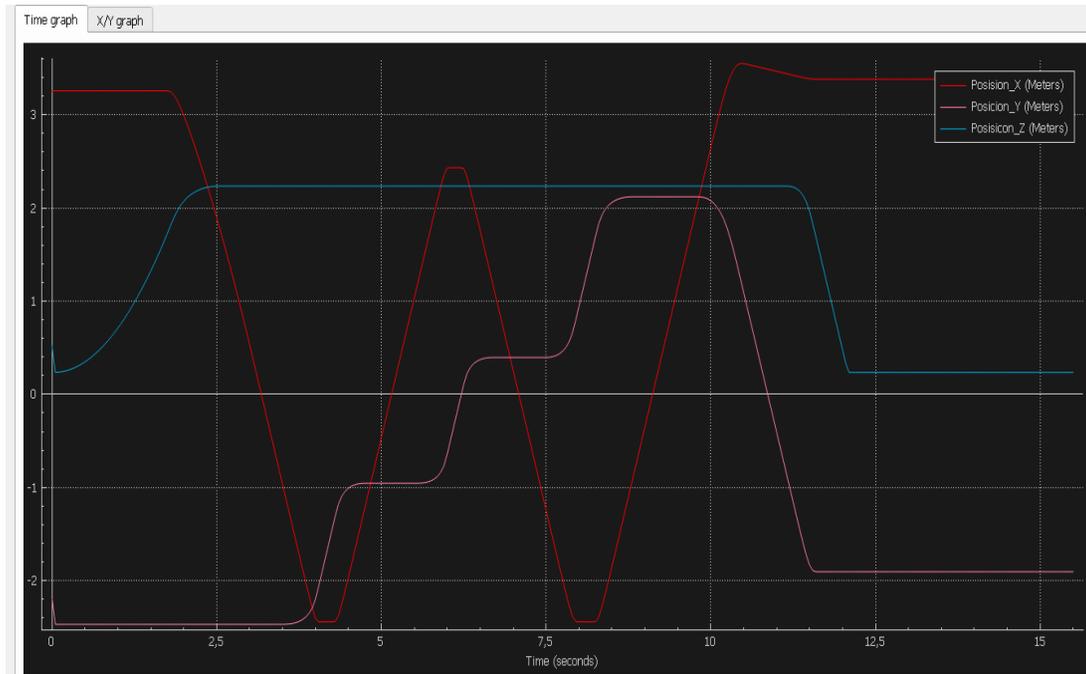
En la Figura 62 se muestra la gráfica de velocidad en el eje Z. Esta gráfica representa la velocidad del dron en la dirección del eje Z, donde una velocidad positiva indica un ascenso y una velocidad negativa indica un descenso.

**Figura 62** Gráfica de velocidad del eje Z.



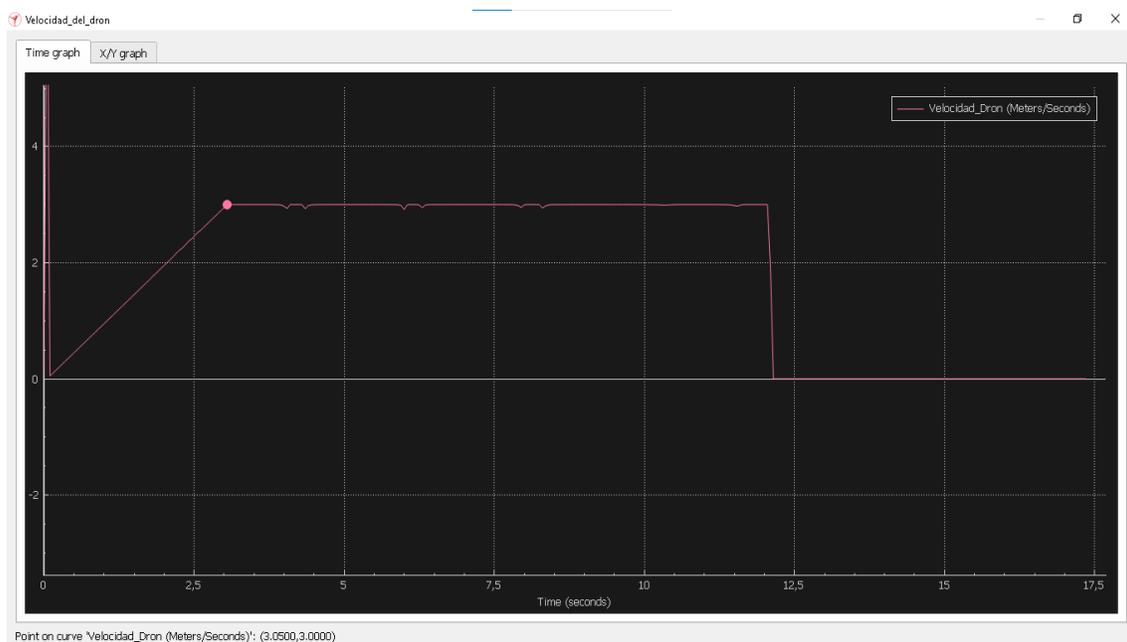
En la Figura 63 se presentan las gráficas de posición del dron en los diferentes ejes. Esta figura muestra cómo varía la posición del dron a lo largo del tiempo en cada uno de los ejes. Una posición positiva indica un traslado en sentido positivo del eje correspondiente, mientras que una posición negativa indica un traslado en sentido negativo con respecto al eje de referencia. Al llegar al punto de partida, las líneas de las tres posiciones se mantienen constantes, indicando la posición inicial del dron.

**Figura 63** Gráfica de las posiciones del dron en los ejes X, Y, Z.



En la Figura 64 se presenta la gráfica de velocidad del dron a lo largo de toda la trayectoria. En esta gráfica se puede observar que al principio la velocidad aumenta gradualmente hasta alcanzar la velocidad solicitada. Una vez que el dron alcanza la velocidad deseada, se mantiene constante durante el recorrido hasta llegar al punto de partida. En este punto, la velocidad comienza a disminuir hasta alcanzar cero, indicando que el recorrido de la ruta establecida ha finalizado.

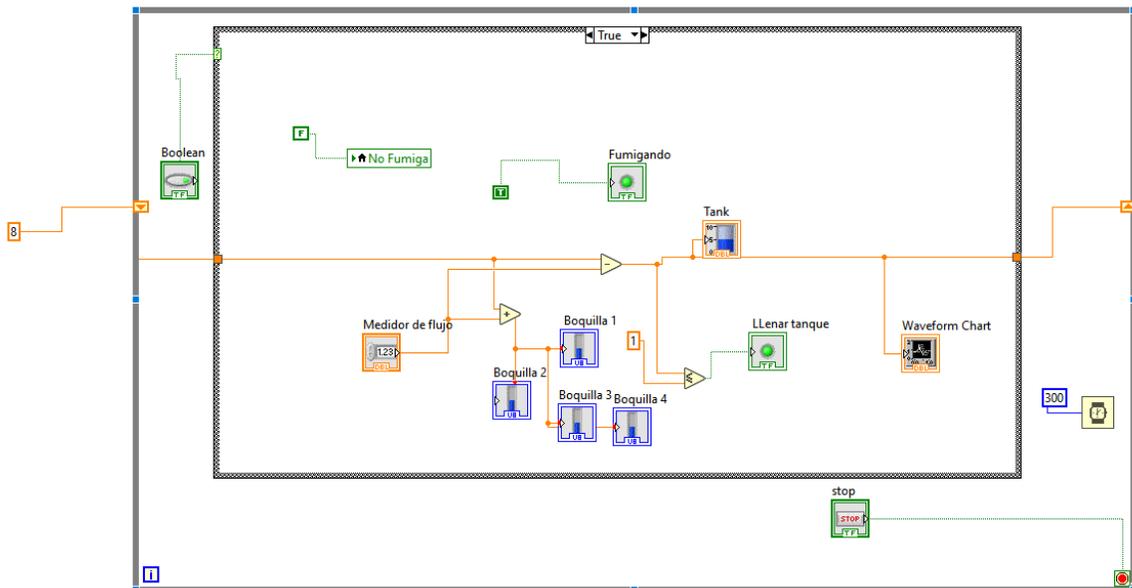
**Figura 64** Gráfica de velocidad del dron.



#### 4.7 Simulación del control del sistema de fumigación

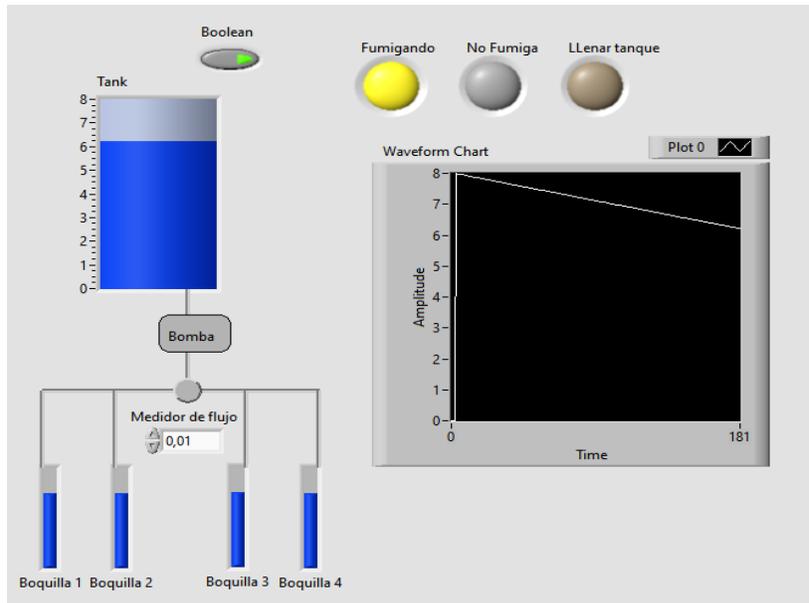
Para esta simulación, se implementó un control On/Off el cuál es activado por el controlador de vuelo una vez que identifica la coordenada inicial para la fumigación. Este control envía una señal a un controlador pequeño, como un Arduino, que se encarga de activar la bomba. A través de un medidor de flujo, donde se determina el caudal deseado. Para este caso de simulación, se estableció un caudal constante de 0,56 litros por minuto, lo que equivale a una velocidad de flujo de 0,01 litros por minuto. Con esta velocidad, se calculó un tiempo de fumigación de aproximadamente 738 segundos, lo que representa 12 minutos de fumigación óptima con el tanque lleno. La Figura 65 muestra el código utilizado para la simulación de este sistema de fumigación con el software LabView.

Figura 65 Código de programación del sistema de fumigación.



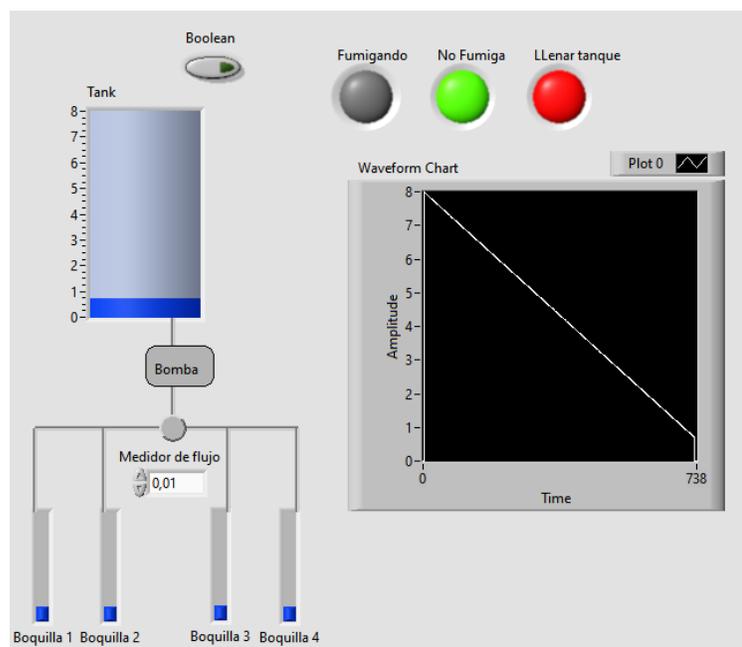
La Figura 66 representa el sistema de fumigación en simulación, donde se puede observar el vaciado del tanque a una velocidad constante que determina el flujo del pesticida hacia las cuatro boquillas de aspersión. Estas boquillas se encargan de rociar los cultivos de frutilla. Además, se incorporó un LED amarillo que indica claramente cuando el sistema de fumigación está en funcionamiento.

**Figura 66** Simulación del sistema de fumigación en funcionamiento.



En la Figura 67, se muestra el tiempo que tarda el sistema de fumigación en completar la tarea a una velocidad constante de 0.01 litros por minuto. El resultado obtenido es un tiempo de fumigación de 12 minutos. El LED verde indica cuando el sistema ha dejado de fumigar, mientras que el LED rojo indica que el nivel de líquido en el tanque está por debajo del mínimo requerido, Para esta simulación, se estableció un volumen mínimo de 1 litro. Cuando esto ocurre, se enciende el LED rojo, indicando la necesidad de llenar el tanque.

**Figura 67** Resultado de la simulación del sistema de fumigación.



## 4.8 Análisis de costos

Para la implementación y construcción del prototipo, se presenta la Tabla 27, donde se puede apreciar el costo total y unitario de cada elemento que constituye el cuadricóptero diseñado.

*Tabla 27 Costos de los componentes.*

<b>Componentes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio unitario (dólares)</b>	<b>Precio total</b>
Batería	1	319	319
Bomba de agua	1	140	140
Boquilla XR11001VS	4	6	24
Cámara FPV	1	260	260
Controladora de vuelo	1	200	200
Estructura	1	2400	2400
Hélices	2	80	160
Medidor de flujo	1	90	90
Motores	4	200	800
Tanque	1	150	150
Tubería	2	400	800
Radar de cobertura	1	130	130
Variador de velocidad	4	90	360
			<b>Total: 5833 \$</b>

El costo total obtenido es de 5,833 dólares, el cual incluye el costo de los materiales necesarios para ensamblar y construir el dron fumigador. Es importante tener en cuenta que en este cálculo no se consideró el costo de la mano de obra de los técnicos e ingenieros involucrados en la construcción del prototipo. Además, se debe tener en cuenta el costo de una batería adicional que pueda ser reemplazada durante el proceso de fumigación, ya que las baterías tienden a agotarse rápidamente. También se debe tener en cuenta el costo adicional de un control remoto si se desea controlar el dron a distancia.

## Conclusiones:

- Se analizó los sistemas tradicionales de fumigación donde se obtuvo como alternativa de solución utilizar un cuadricóptero fumigador con carga útil de 8 litros. Esta alternativa de solución permite fumigar 4 hectáreas a un volumen de rocío de 2 litros por hectárea, lo que significa que puede fumigar una hectárea en tan solo 4 minutos. Estas características son beneficiosas, ya que reducen significativamente los tiempos de fumigación en comparación con los métodos manuales tradicionales. En resumen, el uso del cuadricóptero fumigador no solo agiliza el proceso de fumigación, sino que también garantiza una mayor seguridad para los agricultores y una protección adecuada de los cultivos de frutilla.
- Se diseñó un prototipo de dron fumigador por software CAD. Los resultados obtenidos en el análisis estático y aerodinámico indican que el chasis de aluminio aeroespacial 6061-T6 es seguro y adecuado como marco y unión de todos los componentes mecatrónicos del dron. El factor de seguridad de 8 confirma que el diseño cumple con los estándares de seguridad requeridos. Además, los cálculos realizados en los elementos mecatrónicos han determinado un tiempo de vuelo de 22 minutos con un nivel de operación del 76%. Esto significa que el dron puede volar de manera autónoma y eficiente durante este tiempo, lo que permite cubrir una amplia área de fumigación. El tiempo de consumo del tanque de 14 minutos garantiza que el sistema tenga suficiente autonomía para completar la misión sin interrupciones. En resumen, el prototipo de dron fumigador diseñado demuestra ser seguro, autónomo y eficiente, lo que lo convierte en una excelente alternativa para la fumigación de cultivos de frutilla.
- Se simuló el prototipo diseñado con clima cálido y templado mediante software de simulación especializado. Los resultados de la simulación muestran una eficiencia del 85% en un rango de velocidad de 35 a 40 kilómetros por hora, con un consumo máximo de corriente de 60 amperios. Con base en los resultados obtenidos, se determinó que el tiempo de fumigación óptimo es de 18 minutos para cubrir un área de una hectárea. Desde el despegue en la coordenada de inicio de fumigación hasta el aterrizaje en la coordenada final, el dron es capaz de completar la misión de manera autónoma. Esto valida el desempeño del equipo en una hectárea. En resumen, los resultados de la simulación respaldan la eficiencia y capacidad del prototipo diseñado para realizar la fumigación de manera autónoma y efectiva en cultivos de frutilla.

## Recomendaciones:

- Es importante destacar que para el control remoto del dron fumigador es necesario establecer la conexión entre el controlador de mando y el controlador de vuelo Pixhawk cube. Aunque esta integración no fue considerada en el presente proyecto, es un paso fundamental para el control y manejo del dron de forma remota. El controlador de mando permite al operador enviar comandos y controlar las acciones del dron, como el despegue, aterrizaje, cambios de dirección y ajustes de altitud. Por otro lado, el controlador de vuelo es el encargado de recibir y procesar estos comandos, así como de realizar los ajustes necesarios para el vuelo seguro y eficiente del dron. La vinculación entre ambos controladores permite una comunicación directa y en tiempo real, lo que garantiza un control preciso y seguro del dron durante las operaciones de fumigación. Es fundamental considerar esta integración en futuros desarrollos y aplicaciones del dron fumigador para asegurar un control remoto efectivo y confiable.
- Es fundamental tener en cuenta el peso total del dron, incluyendo la carga útil, para asegurar el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos y el sistema de propulsión seleccionado. Es recomendable que el peso del dron, incluyendo la carga útil, sea inferior a 25 kg. El exceso de peso puede generar una sobrecarga en los componentes electrónicos, especialmente en los motores, lo que puede afectar su rendimiento y durabilidad. Además, un peso excesivo puede afectar la capacidad de vuelo del dron, reducir su maniobrabilidad y aumentar el consumo de energía.
- Es importante considerar el presupuesto necesario para la construcción del dron fumigador, incluyendo los componentes adicionales. Se estima que el costo máximo con estos componentes adicionales sería de aproximadamente 6000 dólares, lo que incluiría todos los materiales necesarios para la construcción del dron. Es importante destacar que este costo de construcción es significativamente menor en comparación con los drones fumigadores profesionales disponibles en el mercado, los cuales suelen superar los ocho mil dólares. Esto representa una ventaja económica al optar por construir un prototipo personalizado en lugar de adquirir un dron fumigador comercial. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el costo total puede variar dependiendo de los componentes específicos utilizados. Por lo tanto, se recomienda realizar un análisis detallado de los costos y presupuesto antes de iniciar la construcción del dron fumigador.

## Referencias:

- [1] R. Ploetz, « Enfermedades y Plagas: Un Análisis de su Importancia y Manejo,» 2010. [En línea]. Available:[https://www.musalit.org/viewPdf.php?file=IN040530\\_spa.pdf&id=14325#:~:text=Las%20enfermedades%20afectan%20todas%20las,derecho%20propio%20\(Gold%20et%20al.pdf](https://www.musalit.org/viewPdf.php?file=IN040530_spa.pdf&id=14325#:~:text=Las%20enfermedades%20afectan%20todas%20las,derecho%20propio%20(Gold%20et%20al.pdf). [Último acceso: 04 12 2022].
- [2] G. M. VERA LOPEZ, "Modelo de Programa de Vigilancia de la Salud por la Exposición de Glifosato en Trabajadores Agrícolas", resumen extendido de Tesis de Grado, UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL, Guayaquil, 2015. Accedido el 10 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible:  
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/21011/1/TESIS%20DRA.%20VERA%20LOPEZ.pdf>
- [3] M. Sentous, "Problemática en la aplicación de agroquímicos en la zona urbano rural de Río Cuarto", Tesis de Grado, Universidad Empresarial Siglo Veintiuno, Río Cuarto, 2013. Accedido el 10 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible:  
[https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/bitstream/handle/ues21/11914/TESIS\\_PEHUEN.pdf?sequence=1&isAlloed=y](https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/bitstream/handle/ues21/11914/TESIS_PEHUEN.pdf?sequence=1&isAlloed=y)
- [4] J. R. N. Zamora, «UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO,» 20 06 2019. [En línea]. Available:  
<https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/3708/1/T-UTEQ-0060.pdf>. [Último acceso: 03 12 2022].
- [5] Y. F. E. Romero, «Fundación Universitaria Los Libertadores,» 05 11 2021. [En línea]. Available:  
<https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/4898#:~:text=El%20principal%20aporte%20expuesto%20en,la%20ciudad%20de%20C3%9Ambita%20%2D%20Boyac%C3%A1..> [Último acceso: 03 12 2022].
- [6] F. R. Yáñez Valverde, "Implicaciones ambientales y sociales del uso y manejo de agroquímicos en la producción de maíz suave en la Provincia de Bolívar", Tesis de maestría, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, Quito, 2019. Accedido el 4 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10469/15759>
- [7] M. d. P. VITERI Vera y M. C. TAPIA Toral, "Economía ecuatoriana: de la producción agrícola al servicio", Revista ESPACIOS, vol. 39, n.º 32, p. 1, 2018. Accedido el 5 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible: <http://www.revistaespacios.com/a18v39n32/18393230.html>.
- [8] D. F. Mayanquer Gavilanez, "SISTEMA AUTÓNOMO DE PULVERIZACIÓN PARA FUMIGACIÓN DE PLANTACIONES DE FRUTILLA ASISTIDO POR UN DRONE", Trabajo de Graduación, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, AMBATO, 2019. Accedido el 21 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/30072>
- [9] Diego Saul Castillo Jumbo, "ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA DE LOS PESTICIDAS EN EL CULTIVO DE FRUTILLA (Fragaria dioica), AL NORTE DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA 2012.," 2013. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4060>
- [10] E. A. L. VEGA, "“SISTEMA ELECTRÓNICO DE DETECCIÓN DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS ORGANOCORADOS EN CULTIVOS DE FRUTILLA PARA ESTABLECER UN MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS (MIP),” 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11676>
- [11] Y. Espitia and S. Santiago, "Diseño Conceptual y Preliminar de un UAV Fumigador para Cultivos de Papa en Úmbita – Boyacá," 2021, [Online]. Available: <https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/4898>
- [12] P. G. Ulibarry, «Biblioteca del congreso Nacional de Chile,» 01 01 2019. [En línea]. Available: [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/26823/2/Efecto\\_de\\_los\\_plaguicidas\\_en\\_la\\_Salud.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/26823/2/Efecto_de_los_plaguicidas_en_la_Salud.pdf). [Último acceso: 04 12 2022].
- [13] E. Pino, "Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología", SCIELO, vol. 37, n.º 1, p. 1, 2019. Accedido el 24 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>

- [14] R. Ríos Hernández, "Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión", *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 11, n.º 4, p. 78, 2021. Accedido el 30 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/journal/5862/586268743010/586268743010.pdf>
- [15] A. González, G. Amarillo, M. Amarillo y F. Sarmiento, "Drones Aplicados a la Agricultura de Precisión", *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, vol. 10, n.º 1, p. 26, marzo de 2016. Accedido el 26 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.22490/25394088.1585>
- [16] A. A. A. Araveña, "Propuesta de Diseño Conceptual de un Dron Agrícola Fumigador para incrementar el nivel de competitividad de la empresa Servicios Generales JB," *Universidad Tecnológica del Perú*, 2021. Available: [https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/5307/A.Acuña\\_Trabajo\\_de\\_Suficiencia\\_Profesional\\_Titulo\\_Profesional\\_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/5307/A.Acuña_Trabajo_de_Suficiencia_Profesional_Titulo_Profesional_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [17] J. Orna and P. Dávila, "Diseño, construcción y control de un hexacóptero de monitoreo," 2015. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10924>
- [18] J. A. V. Tuesta, "SISTEMA MECATRÓNICO AUTOMÁTICO PARA INTERCAMBIO DE BATERÍAS EN UNA PLATAFORMA DE ATERRIZAJE PARA DRONES DE TIPO MULTIROTOR," 2020. [Online]. Available: [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/19749/VALDIVIA\\_TUESTA\\_JANIER\\_SISTEMA\\_MECATRONICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/19749/VALDIVIA_TUESTA_JANIER_SISTEMA_MECATRONICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [19] F. G. J. Alexander and H. P. M. Daniel, "DISEÑO DE UN SISTEMA DE FUMIGACIÓN AÉREA NO TRIPULADO PARA LA APLICACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS EN SEMBRÍOS DE ARROZ, LA CRUCETA – TAMBOGRANDE, PIURA," 2011. [Online]. Available: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/10159>
- [20] ConfiDron, «dron Tricopter, Quadcopter, Hexacopter y Octocopter,» 11 10 2018. [En línea]. Available: [Último acceso: 19 04 2023]. <https://www.loquemassevende.com/drones-y-robotica/que-es-un-dron-tricopter-quadcopter-hexacopter-y-octocopter/>.
- [21] Yinkun Creative Park, «HGS T10 ASSEMBLY DRONE,» 09 05 2022. [En línea]. Available: <https://www.hongfeidrone.com/hgs-t10-assembly-drone-10-liter-agricultural-type-product/>. [Último acceso: 15 04 2023].
- [22] M. L. Zhou, «Tta M4e Agras Agrícola,» 15 06 2018. [En línea]. [Último acceso: 16 04 2023]. Available w:<https://ttadrone.en.made-in-china.com/product/cFPTnhpxaHkK/China-Tta-M4e-Agras-Agricultural-Spraying-Drone-5L-Tank-Loading-Payload-Uav-Agriculture-Drone.html>.
- [23] C. M, «DJI AGRAS T10,» 06 12 2022. [En línea]. Available: [https://www.crutchfield.com/S-lveWyUsxi6/p\\_964CPAG421/DJI-AGRAS-T10.html](https://www.crutchfield.com/S-lveWyUsxi6/p_964CPAG421/DJI-AGRAS-T10.html). [Último acceso: 14 05 2023].
- [24] TECMUNDO, «Dron XAG P30,» 16 06 2019. [En línea]. Available: . [Último acceso: 14 05 2023]\_[https://connectamericas.com/sites/default/files/company\\_files/Ficha%20Te%CC%81cnica%20P30\\_compressed%20%281%29.pdf](https://connectamericas.com/sites/default/files/company_files/Ficha%20Te%CC%81cnica%20P30_compressed%20%281%29.pdf).
- [25] R. R. Gonzáles, «CES Edupack,» 22 04 2022. [En línea]. Available: [Último acceso: 18 05 2023]. <https://sicpd.usal.es/display/LAZ/CES+Edupack>.
- [26] Amazon.com. 'Mini bomba de agua sumergible para tanque de peces acuario fuente maceta DC12V 4.8W.' [En línea]:" <https://www.amazon.com/-/es/Anself-sumergible-tanque-acuario-fuente/dp/B011COX328> (accessed Jun. 21, 2023).
- [27] Javier Sanz Gómez, "Montaje y configuración de un dron de carreras. Estudio de empuje y autonomía," 2019. <https://core.ac.uk/download/pdf/288502145.pdf>
- [28] ebay.com."Boquilla Teejet XR11001VS, punta plana de aerosol de rango extendido, naranja." [En línea]: <https://www.ebay.com/itm/304595284366> (accessed Jun. 21, 2023).

- [29] dhgate."Medidor de flujo para drones agrícolas solo para control de vuelo JIYI K3A K3A-PRO." [En línea]: <https://es.dhgate.com/product/flow-meter-for-agricultural-drone-just-for/466218897.html> (access Jun. 21, 2023).
- [30] AliExpress.com."360 sensor de radar agrícola para altitud UAV, Sensor de medición de altura para drones, controlador de vuelo pixhawk." [En línea]: <https://es.aliexpress.com/item/1005003540602997.html> (accessed Jun. 21, 2023).
- [31] T-motor.com."P80III Pin KV120." [En línea]: [https://store.tmotor.com/goods-785-P80\\_Pin\\_KV120.html](https://store.tmotor.com/goods-785-P80_Pin_KV120.html) (accessed Jun. 21, 2023).
- [32] T-Motor.com."MF2815-2PCS/PAIR." [En línea]: <https://store.tmotor.com/goods-745-MF2815-2PCSPAIR.html> (accessed Jun. 21, 2023).
- [33] Alibaba.com."T-motor Flame100a Lv Esc Controlador Electrónico De Velocidad Para Helicóptero Impermeable Rotor. [En línea]: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/T-Motor-Flame100A-LV-ESC-Electronic-60663484597.html> (accessed Jun. 21, 2023).
- [34] foxtechfpv.com."Foxttech Diamond 6S 22000mAh 16000mAh 27000mAh 30000mAh Semi-solid-state Li-ion battery for Multicopter and VTOL." [En línea]: <https://www.foxtechfpv.com/foxttech-diamond-6s-22000mah-semi-solid-state-li-ion-battery.html> (accessed Jun. 21, 2023).
- [35] R. C. Hibbeler, Mecanica de Materiales. Accessed: Jun. 22, 2023. [Online]. Available: [http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio\\_sin\\_paredes/fac\\_arqui/dis\\_simpli\\_estruc/05.pdf](http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_arqui/dis_simpli_estruc/05.pdf)
- [36] Ecalc.ch."Calculador de Multicópteros." [En Línea]: <https://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php> (accessed Jun. 21, 2023).
- [37] J. Passuni Córdova, «Mission Planner,» 15 02 2017. [En línea]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7841>. [Último acceso: 23 05 2023].
- [38] Amazon.com. 'Pixhawk PX4 Controlador de vuelo Pixhawk con tablero de control de vuelo.' [En línea]: <https://www.amazon.com/Readytosky-Pixhawk-Controller-Autopilot-Splitter/dp/B07CHQ7SZ4> (accessed Jun. 21, 2023)
- [39] R. Carbonell Lázaro, "Control remoto bifrecuencia de un cuadricóptero," 2019. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/130304/Carbonell%20Control%20remoto%20bifrecuencia%20de%20un%20cuadric%20C3%B3ptero.pdf?sequence=1>
- [40] B. M. Damián, E. Rodríguez, and L. J. Cortéz, "Modelado y simulación de un robot Autobalanceado mediante Coppelia Sim," Rev. INNOVA Ing., vol. 1, p. 9, 2021, [Online]. Available: <https://innovaingenieria.uagro.mx/innova/index.php/innova/article/view/81/41>