

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño y simulación de un dron para realizar fumigación en plantaciones  
de banano

### **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

### **Ingenieros en Mecatrónica**

Presentado por:

Bajaña Vásquez Moisés Alejandro

González Yagual Charly Mauricio

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación se lo dedico a mi madre Rina Yagual, quien me ha brindado su amor y su ejemplo de perseverancia para alcanzar mis metas. A mis tías Anita Arcos, Bélgica Núñez y Georgina Yagual que siempre me han brindado su apoyo y me han impulsado para lograr crecer en la vida.

**Charly González**

El presente documento lo dedico en primer lugar a mis padres quienes hicieron de mí la persona que soy. A mis hermanos por estar siempre presente, en particular a María del Carmen Bajaña, quien ha sido un ejemplo a seguir y siempre me ha brindado su apoyo. A mi primo Héctor Vásquez quien, más que un primo, ha sido un hermano, un amigo. Y sin ser menos importante a mi fallecido abuelo Héctor M. Vásquez quien dejó gratos recuerdos y enseñanzas.

**Moisés Bajaña**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por brindarme la vida. A mis padres por ser pilar fundamental en mi vida y acompañarme en el camino a este logro. A mi tutor, Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D., por darme la oportunidad y guiarme en este proyecto. Al M.Sc. Efraín Terán quien, como coordinador y profesor de la carrera, nos ha dado sus consejos y su confianza para tener la primera promoción de Mecatrónica en Espol. A mis profesores por compartir sus conocimientos a lo largo de la carrera. A mis amigos Álvaro Soriano, Daniel Sacoto, Moisés Bajaña y Eduardo Ceballos por estar siempre en los buenos y malos momentos.

**Charly González**

Por haber sido parte de este logro académico, agradezco a Dios por haberme creado. También a mis abuelas: Antonia Rizzo, Eugenia Ochoa por haberme abierto las puertas de sus respectivos hogares y por brindarme sus enseñanzas. A mis tíos, de manera particular, a mi tía Viviana quien me mostró que para triunfar se requiere: constancia y disciplina. A mis tíos: Cecilia Vásquez, Tony López, y primo Alex López por brindarme su apoyo al iniciar este proyecto. A mi primo Cesar Menoscal, a mis tíos: Angela Vásquez y Francisco Rizzo. Y en fin a todos los que aportaron de una u otra manera en el desarrollo de mi vida académica. A Álvaro Soriano, Eduardo Ceballos y Daniel Sacoto, Charly González compañeros y amigos.

**Moisés Bajaña**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Moisés Alejandro Bajaña Vásquez y Charly Mauricio González Yagual y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

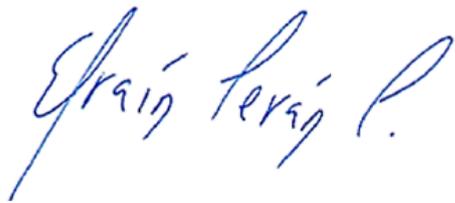
Moisés Alejandro Bajaña Vásquez



---

Charly Mauricio González Yagual

## EVALUADORES



---

**Efraín Terán, M.Sc.**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Marcelo Fajardo, Ph.D.**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Ecuador es el principal productor de banano en el mundo, sector que genera ingresos significativos al país. Los procesos involucrados en su cultivo presentan algunas falencias. Uno de ellos es la fumigación, generando contaminación y daños a la salud. Es por lo que se plantea el diseño de un dron para realizar fumigación en plantaciones de banano. Partiendo de un análisis del sector (revisión bibliográfica) y modelos similares se ha determinado que el precio de los drones de fumigación se aproxima a los \$25 000 y su producción es escasa en el país.

Para el desarrollo de este trabajo se empleó el software Autodesk Inventor Professional 2019, con licencia 900-91628620 / 797K1, para el diseño mecánico.

El diseño final obtenido tiene una tasa de fumigación de 9.06 min/ha (33% por debajo de la media), 4 ha de fumigación sin recargar baterías, el peso sin carga de 26 kg y uno con carga de 43 kg. Además, el dron presenta la capacidad de plegarse siendo sus dimensiones: 75 cm de alto, 66 cm de ancho y 66 cm largo con un precio aproximado de \$15 000. El presente diseño permitirá al pequeño productor (menos de 30 ha) reducir sus costos y tiempos de fumigación, así como reducir el contacto del pesticida con el operador. Además, de fabricarse el dron aportará a la economía ecuatoriana ya que emplea entre sus componentes materiales de producción nacional.

**Palabras Clave:** Dron, banano, fumigación, diseño, simulación.

## **ABSTRACT**

*Ecuador is the main banana producer in the world, a sector that generates significant income for the country, although the way it is carried out has some shortcomings. Specifically, fumigation in many sectors still generates pollution and health damage. This is how, at present, the Design of a drone to perform fumigation in banana plantations is proposed. The first stage is to analyze the banana industry (bibliographic review) and similar models, it is determined that the price of fumigation drones ranges from \$ 25,000 and production is scarce in the country.*

*For the development of this, the software Autodesk Inventor Professional 2019 with license 900-91628620 / 797K1, was used for the mechanical design.*

*The final design has a spraying rate of 9.06 min / ha (33% below the average) was obtained, 4 ha of fumigation without recharging batteries, the unloaded weight of 26 kg, and one with a load of 43 kg. Besides, the drone can fold, its dimensions being 75 cm height, 66 cm at large and 66 cm width, with an approximate price of \$ 15,000. This is how the present design will be allowed to the small producer (less than 30 ha) reduce your costs and fumigation times, as well as reduce pesticide contact with the operator. Besides, if the drone is manufactured, it will contribute to the Ecuadorian economy since it uses materials from national production among its components*

**Keywords:** *banana, fumigation, design, simulation.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1 .....	1
1.    Introducción .....	1
1.1    Descripción del problema .....	2
1.2    Justificación del problema .....	4
1.3    Objetivos .....	6
1.3.1    Objetivo General .....	6
1.3.2    Objetivos Específicos.....	6
1.4    Marco teórico.....	6
1.4.1    Agricultura en Ecuador.....	6
1.4.2    Enfermedades presentes en el sector bananero .....	7
1.4.3    Pesticidas empleados .....	8
1.4.4    Drones en la agricultura .....	9
1.4.5    Drones en Ecuador .....	11
1.4.6    Trabajos relacionados.....	12
1.4.7    Aerodinámica y configuraciones de la estructura .....	12
1.4.8    Descripción de componentes electrónicos y estructurales .....	13
CAPÍTULO 2 .....	15

2.	Metodología .....	15
2.1	Alternativas de solución .....	15
2.2	Pasos seguidos en el diseño .....	16
2.3	Requerimientos de diseño .....	17
2.4	Especificaciones técnicas .....	18
2.5	Diseño conceptual .....	19
2.6	Diseño detallado .....	19
2.6.1	Sistema de fumigación .....	19
2.6.2	Diseño de la estructura .....	24
2.6.3	Diseño del sistema de control .....	27
2.6.4	Cálculos de Potencia .....	30
CAPÍTULO 3 .....		36
3.	Resultados y análisis .....	36
3.1	Sistema de fumigación .....	36
3.2	Análisis de la base y del brazo de soporte de motor .....	39
3.3	Sistema de control .....	47
3.4	Controladores de vuelo .....	48
3.5	Motores .....	52
3.6	Selección de elementos de alimentación .....	55
3.7	Diagrama de conexiones eléctricas .....	55
3.8	Análisis de costos .....	57
CAPÍTULO 4 .....		59
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	59
4.1	Conclusiones .....	59
4.2	Recomendaciones .....	60
BIBLIOGRAFÍA		

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PEA	Población Económicamente Activa
PIB	Producto Interno Bruto
AP	Agricultura de Precisión
USEPA	United State Environment Protection Agency
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado
TCM	Teoría de la Cantidad de Movimiento
TIC	Tecnología de Información y Comunicaciones
msnm	Metros sobre el nivel del mar
IEC	International Electrotechnical Commission
VTOL	Vertical Take – Off and Landing
PMU	Power Management Unit
DCL	Diagrama de Cuerpo Libre
MC	Main Controller
IA	Inteligencia Artificial

## SIMBOLOGÍA

ha	Hectárea
g	Gramos
m	Metros
M	Masa
$\rho$	Densidad
V	Volumen
L	Litros
min	Minutos
T	Empuje
kg	Kilogramos
kgf	Kilogramos fuerza
V	Voltios
I	Corriente
W	Watts
$F_s$	Factor de seguridad
$S_{as}$	Separación entre los aspersores
$H_{as}$	Altura de aspersion
$D_{tmax}$	Ancho máximo del tren de aterrizaje (distancia máxima).
$\alpha$	Ángulo de aspersion
$\beta$	Complemento de $\alpha/2$
Wd	Peso del dron (sin incluir el tanque con el líquido)
Wr	Peso del reservorio con el líquido
Ra	Resistencia del aire
Lt	Longitud del tren de aterrizaje
Hr	Altura del reservorio
Hb	Altura de la batería
Hi	Holgura inferior (Tren de aterrizaje)
P1	Presión a la salida de la bomba
P2	Presión a la salida del aspersor

$V_1$	Velocidad en la bomba
$V_2$	Velocidad de salida de los aspersores
$Z_1$	Altura de la bomba
$Z_2$	Altura de los aspersores
$f$	Coefficiente de fricción viscosa
$L_1, L_2, \dots, L_6$	Longitudes en diferentes partes del sistema de fumigación.
$D, d$	Diámetro interno de una tubería
$K_L$	Perdida en un accesorio
$Re$	Número de Reynolds
$\varepsilon$	Rugosidad relativa de la tubería
$\Delta$	Rugosidad absoluta de la tubería
$l_t$	Longitud entre el punto de apoyo del reservorio y la base del dron
$R_x$	Reacción horizontal en el tren de aterrizaje
$R_y$	Reacción vertical en el tren de aterrizaje

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Plantaciones de Banano .....	2
Figura 1.2 Fumigación con mochila de aspersión .....	3
Figura 1.3 Fumigación con avionetas .....	3
Figura 1.4 Exportaciones de banano 2013-2016 .....	4
Figura 1.5 Tipos de drones según el número de rotores .....	9
Figura 1.6 DJI Agras MG-1 .....	10
Figura 1.7 FDXD-6R-16L SPRAYING DRONE .....	10
Figura 1.8 VANT utilizado por la empresa Drone & GIS .....	11
Figura 1.9 Partes de la estructura mecánica.....	13
Figura 1.10 Hardware empleado en un sistema de fumigación variable .....	14
Figura 2.1 Matriz de decisión para Modelo de VANT .....	15
Figura 2.2 Metodología para el diseño del VANT .....	16
Figura 2.3 Diseño conceptual hexacoptero de fumigación.....	19
Figura 2.4 Esquema sistema de fumigación .....	20
Figura 2.5 Ubicación de los aspersores en el dron .....	22
Figura 2.6 División del terreno según las pasadas de vuelo. ....	23
Figura 2.7 DCL del dron en vuelo .....	24
Figura 2.8 DCL barra del tren de aterrizaje.....	25
Figura 2.9 DCL de la base .....	25
Figura 2.10 Dimensiones consideradas para el VANT.....	27
Figura 2.11 Esquema de controlador PID.....	29
Figura 2.12 Diagrama del sistema de control de altitud y orientación .....	30
Figura 2.13 Hélices 30.2X9.9 .....	32
Figura 2.14 Variación de la velocidad inducida en vuelo descendente .....	34
Figura 3.1 Esquema del sistema de fumigación .....	38
Figura 3.2 Resultados obtenidos en la simulación, Desplazamiento.....	39
Figura 3.3 Factor de seguridad obtenido en el brazo.....	39
Figura 3.4 Total tubos empleados en brazos (Al 7075).....	40
Figura 3.5 Optimización topológica de la base del dron.....	41
Figura 3.6 Componentes a fabricarse con Al 7075 .....	43

Figura 3.7 Configuración geométrica entre el reservorio y tren de aterrizaje .....	43
Figura 3.8 Dron vista isométrica .....	44
Figura 3.9 Vista superior del Hexacóptero .....	45
Figura 3.10 VANT plegado .....	46
Figura 3.11 Características inerciales del dron .....	46
Figura 3.12 Respuesta del sistema para Z en ascenso .....	47
Figura 3.13 Velocidad del sistema en ascenso .....	47
Figura 3.14 Controlador NAZA M-V2 .....	48
Figura 3.15 PMU NAZA M-V2 .....	49
Figura 3.16 Módulo GPS .....	50
Figura 3.17 Modulo LED independiente .....	50
Figura 3.18 Interfaz software NAZA M V2 .....	51
Figura 3.19 Control remoto RadioLink .....	51
Figura 3.20 Características motores Titan T8000 .....	53
Figura 3.21 Motor Titan T8115 .....	53
Figura 3.22 Motor T8115 valores de potencia para hélices de 30 in .....	53
Figura 3.23 ESC Motor T8115 .....	54
Figura 3.24 Diagrama de conexiones eléctricas .....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación entre tipos de fumigación.....	5
Tabla 1.2 Principales enfermedades presentes en el sector bananero ecuatoriano ...	7
Tabla 1.3 Sistemas de propulsión.....	14
Tabla 2.1 Tabla con requerimientos .....	17
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas .....	18
Tabla 2.3 Parámetro del sistema de fumigación .....	21
Tabla 2.4 Comparación entre fibra de carbono y aluminio 7075 .....	26
Tabla 3.1 Componentes del sistema de fumigación.....	36
Tabla 3.2 Parámetros de funcionamiento del sistema de fumigación .....	38
Tabla 3.3 Especificaciones del perfil seleccionado .....	40
Tabla 3.4 Comparación diseño inicial vs diseño final.....	41
Tabla 3.5 Comparación entre inicial y final de la base del dron .....	42
Tabla 3.6 Características controlador de vuelo NAZA M-V2 .....	49
Tabla 3.7 Análisis de costos .....	57

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Abrazadera tubo - base
PLANO 2	Placa abrazadera
PLANO 3	Brazo – tubo
PLANO 4	Base soporte para motor
PLANO 5	Tren de aterrizaje
PLANO 6	Placa superior
PLANO 7	Placa inferior - base
PLANO 8	Junta base – tren de aterrizaje
PLANO 9	Ensamble del hexacóptero

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) en los últimos años han tenido gran acogida en diversos sectores. Por ejemplo, en producciones audiovisuales, en donde son utilizados para lograr mejores tomas y ángulos de fotografías y videos. Si se toma como criterio de clasificación las características aerodinámicas tenemos tres tipos de VANT: ala fija (*fixed-wing*), ala rotatoria (*rotary-wing*) e híbridos (presentan ambos sistemas). Los de ala fija tienen más aplicaciones en ámbitos militares; en cambio, los de ala rotatoria son más conocidos por el público en general [1],[2]. En el campo de la producción agrícola, conceptos como la Agricultura de Precisión (AP) permiten el ingreso de estas Tecnologías de Información y Comunicaciones (TIC). Dando lugar a la implementación de VANT en procesos de toma de datos, monitoreo o fumigación de cultivos.

En el caso del cultivo de banano, que para Ecuador representa aproximadamente el 35% del PIB que genera el sector agrícola [3], la fumigación en estas plantaciones aún se realiza por métodos manuales (entre otros) en gran parte del país. Esta tiene varias desventajas como el contacto directo del operador con los pesticidas y su tiempo de ejecución.

Motivo por el que se plantea el diseño de un VANT para cumplir tareas de fumigación en plantaciones de banano dentro el contexto ecuatoriano.

## 1.1 Descripción del problema

El sector agropecuario en el Ecuador representa una de las principales fuentes de ingresos. El mismo se sitúa sólo por debajo del sector petrolero. Aporta el 95% de la demanda interna de alimentos, y proporciona empleo al 25% de la Población Económicamente Activa (PEA) [4]. Gran parte de ese porcentaje se debe a la producción y exportación de banano (Figura 1.1) que ha desempeñado un papel importante en el país desde su auge en la década de los cincuenta [4]. Actualmente aporta con alrededor del 1% del Producto Interno Bruto (PIB) y, junto al café y el cacao, lideran el sector agrícola [5]. Para el año 2017 los productores se distribuían de la siguiente manera: 77.8% eran pequeños productores (0 a 30 ha), 17.8% eran medianos productores (30 a 100 ha) y 4.4% eran grandes productores (más de 100 ha) [3].



**Figura 1.1 Plantaciones de Banano [6]**

Una etapa importante en la producción del banano es la fumigación, la cual sirve para combatir hongos y/o insectos causantes de enfermedades en las plantaciones entre las que se encuentran: sigatoka negra, mal de Panamá, moko, elefantiasis, gusano tornillo, entre otras [6]. Actualmente se realiza por dos métodos principalmente. Estos procesos se describen a continuación [7].

**Mochila de aspersión:** consiste en un reservorio, en forma de mochila, lleno del pesticida que se sale por un pulverizador, como se observa en la

Figura 1.2. Pudiendo emplear mochila de fumigación motorizada o manual. Este método es perjudicial para la salud del operario y tiene baja eficiencia ya que es lento con una duración promedio de 17.8 h/ha para la mochila manual [7] y de 10.7 h/ha para la mochila motorizada [8].



**Figura 1.2 Fumigación con mochila de aspersión [10]**

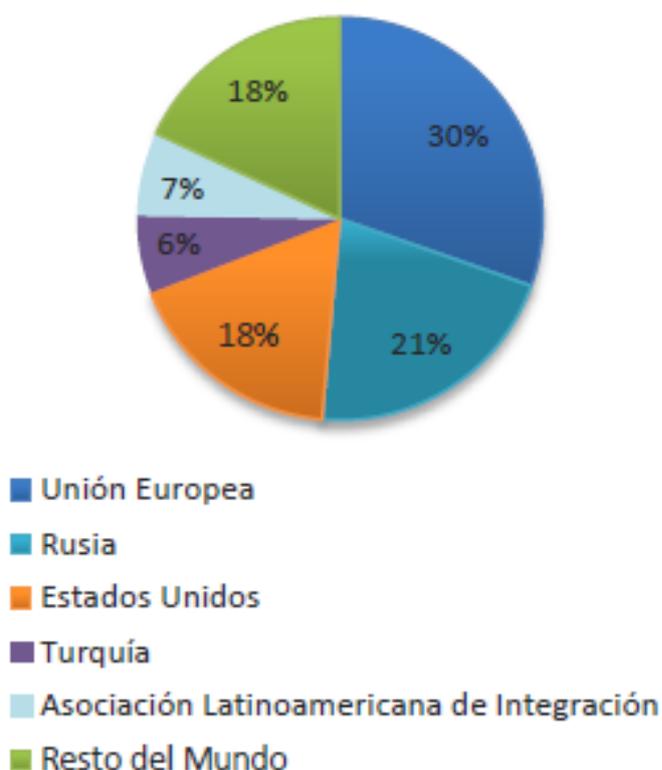
**Avionetas:** es un proceso empleado principalmente por grandes y medianos productores [8]. El pesticida se aplica desde la avioneta por medio de aspersores. Presenta un potencial daño a la salud en sectores aledaños y contaminación ambiental mayor [9]. En la Figura 1.3 se muestra una avioneta realizando fumigación en sobre una plantación de banano.



**Figura 1.3 Fumigación con avionetas [12]**

## 1.2 Justificación del problema

Ecuador es el mayor exportador de banano a nivel mundial. Éste produce casi la tercera parte del total de exportaciones en el mundo. Según un reporte del diario El Universo [10] las exportaciones de plátano y banano alcanzaron 4 645 987 toneladas métricas en el año 2019. [11]. En la Figura 1.4 se muestran los porcentajes de exportación a diversos países entre 2013 y 2016. Lo que equivale a más de la mitad de las exportaciones no petroleras [12]. Para alcanzar estos números, la producción de banano ha ido mejorando con procesos acorde a los estándares de calidad internaciones como por ejemplo: ISO 14001 e ISO 9001 [3].



**Figura 1.4 Exportaciones de banano 2013-2016 [13]**

Investigaciones previas [9] indican que, en Guayas, el 10% de obreros – quienes emplean mochilas de aspersión – presentan problemas de salud relacionados al manejo de pesticidas. Además, los encuestados en este estudio muestran su inconformidad con los resultados obtenidos por el método (mochilas de aspersión). Los métodos de fumigación empleados afectan en cierta medida al medio ambiente, en particular, el suelo y el agua. Además,

las fumigaciones con avionetas o helicópteros pueden afectar la calidad del aire en sectores aledaños [8].

La agricultura de precisión (AP), ayuda a los procesos involucrados en la producción agrícola, automatizando varias partes en la producción [14], de forma que se reduzcan los inconvenientes observados como la contaminación en los alrededores de la producción.

La fumigación mediante un VANT se puede considerar como una herramienta que ayuda en la “Actuación del campo” (cuarta etapa de la AP). Existen antecedentes [7] que indican que emplear VANT en fumigación de sembríos de arroz puede llegar a significar una reducción de costos de hasta el 48%, al compararlo con método manual.

A continuación, se muestra en la Tabla 1.1 una comparativa entre los principales métodos de fumigación empleados en el banano.

**Tabla 1.1 Comparación entre tipos de fumigación (Adaptado de [9], [16], [17])**

<b>Aplicación</b>	<b>Costo por ha [\$]</b>	<b>Eficiencia [min/ha]</b>	<b>Impacto ambiental</b>	<b>Estrés al cultivo</b>	<b>l/ha</b>
<b>VANT</b>	16	13.5	BAJO	NO	20
<b>Mochila de aspersión (manual)</b>	15	90-100	MEDIO	SÍ	12-20
<b>Mochila de aspersión (motorizada)</b>	20	45-55	MEDIO	SÍ	12-20
<b>Avioneta helicóptero</b>	13	0.5-0.6	ALTO	NO	2-25

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar y validar mediante simulaciones un dron para realizar fumigación en plantaciones de banano.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar un análisis de requerimientos técnicos de acuerdo con las necesidades existentes en el sector bananero que permitan desarrollar un producto competitivo.
- Seleccionar el tipo de dron a diseñar.
- Realizar un ensamble digital de la estructura y simular su comportamiento ante fuerzas estáticas y fuerzas dinámicas.
- Diseñar el sistema de fumigación (control y aspersion).
- Seleccionar componentes electrónicos.
- Definir y validar un sistema de control para el manejo del VANT.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Agricultura en Ecuador**

La agricultura es la actividad para cuya finalidad es cultivar la tierra para obtener productos vegetales. En nuestro país este sector es muy importante porque provee materia prima para las industrias y productos para el consumo interno y exportaciones.

Para el año 2017 las exportaciones de banano representaron un 2% de PIB general del país, y un 35% de la producción interna agrícola. En ese mismo año en el país había 162 236 hectáreas de plantaciones de banano y alrededor de 4 473 productores en las provincias de Los Ríos, Guayas y el Oro; que se componen de 3 grupos: pequeños (3 480), medianos (800) y grandes (193) [3].

### 1.4.2 Enfermedades presentes en el sector bananero

Las plantaciones de banano mundialmente se enfrentan con el reto de controlar una serie de problemas, he aquí la importación de realizar procesos de fumigación. A continuación, en la Tabla 1.2, se describen las principales enfermedades encontrados en el país:

**Tabla 1.2 Principales enfermedades presentes en el sector bananero ecuatoriano  
(Adaptado de [15])**

Nombre	Área afectada	Fotografía
<b>Cochinilla</b> ( <i>Dysmicoccus brevipes</i> )	Nudos (parte del tallo donde crecen las hojas).	
<b>Sigatoka Negra</b> ( <i>Mycosphaerella fijiensis</i> M)	Hojas.	
<b>Moko</b> ( <i>Ralstonia solanacearum</i> (Smith))	Fruto, hojas, tallo, raíces.	

<b>Thrips</b> (Chaetanaphothrips signipennis)	Tallo, hojas, fruto.	
---	----------------------	--

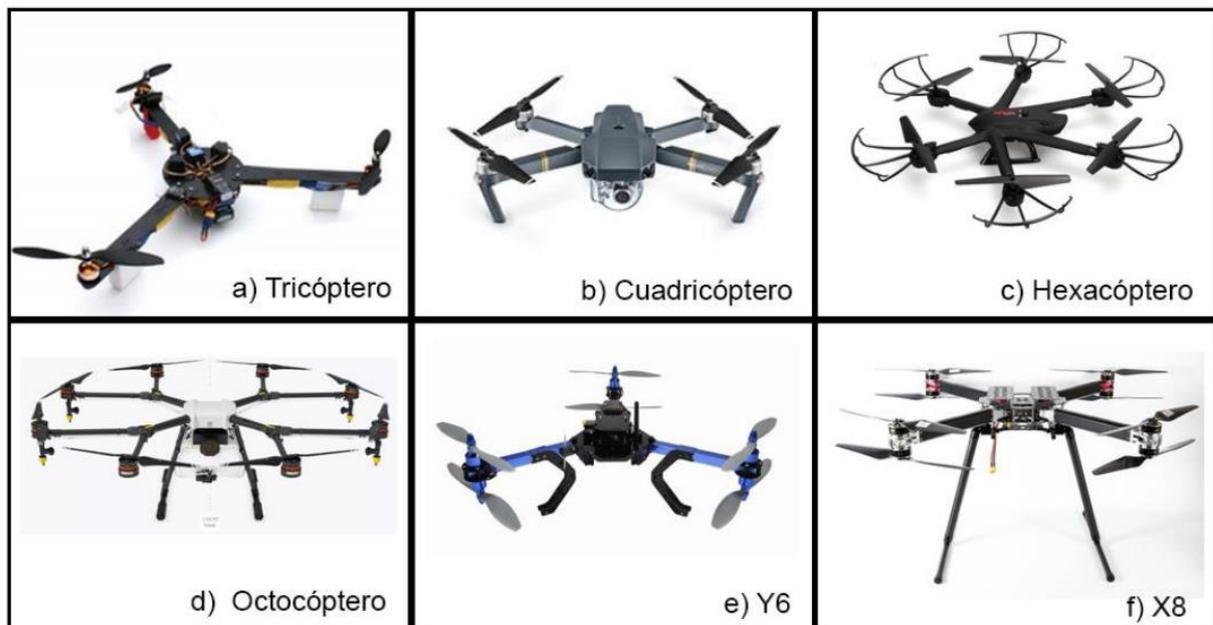
### 1.4.3 Pesticidas empleados

Los plaguicidas son sustancias químicas utilizadas para combatir insectos, hongos, malezas que afectan a los cultivos, pero afectan a animales o personas de manera directa o indirecta. Tienen una alta propagación, pudiendo llegar a contaminar agua, tierra o aire; comprometiendo sectores cercanos al punto de aplicación [16].

Según un estudio de 2016, en países de América de Sur se usan pesticidas que están prohibidos en la Unión Europea (UE) desde el 2007. El principal es el glifosato, 8 de 17 agricultores informaron que usan este producto. Otro producto utilizado es el Ethoprop, considerado altamente cancerígeno para las personas, según la USEPA (*United States Environmental Protection Agency*). De entre estos productos químicos, destacan pesticidas organofosforados como los más empleados en el campo del cultivo de banano [17].

#### 1.4.4 Drones en la agricultura

Un dron es todo aquel VANT que puede ser programado o manejado de forma remota [18]. Como se mencionó en la Introducción, los drones pueden ser considerados en tres categorías, ala fija, ala rotatoria e híbridos. Los de ala rotatoria se pueden clasificar según el número de rotores, en la Figura 1.5 se presentan: tricóptero (3 rotores), cuadricóptero (4 rotores), hexacóptero (seis rotores), y octacóptero (ocho rotores), Y6 (una variante del tricóptero que posee 2 rotores por brazo, es decir, un total de seis) y el X8 (una variante del cuadricóptero que posee 2 rotores por brazo, es decir, un total de 8) [2].



**Figura 1.5 Tipos de drones según el número de rotores [2]**

Hoy en día existen muchas áreas en las que se les ha encontrado aplicación. Como, por ejemplo, entrega de productos a domicilio, fines militares, vigilancia, recreación, cine, levantamientos topográficos, AP, etc.

En particular en la AP se pueden emplear en diferentes subáreas: la fumigación, monitoreo de condiciones ambientales, control de crecimiento (en el que se emplea el índice normalizado de crecimiento vegetal [10], NDVI, por sus siglas en inglés), control de la población, etc. Estas funciones permiten al agricultor mejorar la eficiencia y reducir costos.

El desarrollo de los drones en la AP ha venido creciendo en los últimos años, implementando cada vez más nuevas tecnologías. La fumigación con drones apareció por primera vez en Japón en la década de los ochenta (1980), al combinar un VANT de ala rotatoria con un pequeño tanque. Actualmente se encuentra modelos como el DJI Agras MG-1, mostrado en la Figura 1.6, que incluye un sistema de pulverizado que permite regular la aplicación del fertilizante según las condiciones del medio [18],[19]. O el FDXD-6R-16L SPRAYING DRONE (Figura 1.7) que como su nombre lo indica su capacidad es 16 L.



**Figura 1.6 DJI Agras MG-1 [19]**



**Figura 1.7 FDXD-6R-16L SPRAYING DRONE [20]**

### 1.4.5 Drones en Ecuador

En el mercado local constantemente se suman nuevas empresas enfocadas en el sector agrícola bananero, también en la caña de azúcar. Lo hacen para brindar servicios tecnológicos de monitoreo de los cultivos, aplicando AP [18].

La empresa Inntagri Andina se encuentra presente en el país desde 2012 y se dedica a la distribución de drones con fines de observación en cultivos (detección de enfermedades, estimar población del cultivo, entre otros) [18]. Drone & GIS (toma de imágenes aéreas y mapeo), presta servicio en diferentes áreas, entre ellas la agricultura. Ayudando en el monitoreo, índices de vegetación, linderos de predios agrícolas, topografía para planificación de riego, uno de sus VANT se muestra en la Figura 1.8 [20]. LAS (*Latitude Aerospace Solutions*), produce drones en Ecuador, los mismos que se pueden encontrar desde los \$8000 [21].



**Figura 1.8 VANT utilizado por la empresa Drone & GIS [20]**

#### **1.4.6 Trabajos relacionados**

En áreas afines a la economía se ha evaluado el potencial de esta tecnología en la industria y como modelo de negocio (suministra el servicio de monitoreo por medio de drones a pequeños productores). Marco Chávez, propone un mejoramiento el sector floricultor del grupo Esmeralda mediante el uso de drones [18]. José Navia, propone abarcar una mayor área en un menor tiempo con el uso de drones aplicado al sector arrocero del cantón de Quevedo [6]. En Machala se estudió el empleo de drones como medio de mitigación de la contaminación ambiental en cultivos de banano [9].

En el área de la ingeniería, Diego Mayanquer, añadió a un modelo particular de dron un sistema de pulverización orientado a cultivos de frutilla [22]. Javier Orna y Paul Dávila, realizaron el diseño e implementación de un hexacóptero, usando fibra de carbono, para monitoreo de cultivos [23].

#### **1.4.7 Aerodinámica y configuraciones de la estructura**

Entre los factores que permiten que un VANT vuele se encuentra su aerodinámica. Entre los principios físicos o teorías que describen el vuelo de los drones y que permiten el calcular la potencia requerida se tiene a la Teoría de la Cantidad de Movimiento (TCM), y la Teoría de diseño de Hélice.

La primera permite determinar la potencia requerida para contrarrestar el peso del VANT. Considera que las hélices desplazan el aire circundante hacia abajo, lo que por la tercera ley de Newton significa que el aire produce una fuerza de igual magnitud, pero en dirección contraria. La misma que suspende el vehículo. Es importante también la conservación de la energía y masa. En la segunda, se considera a la hélice como un elemento rígido; basando en el hecho de que la magnitud de la fuerza normal que actúa sobre esta es significativamente mayor al resto, y además ayuda a mantener la hélice firme [2].

### 1.4.8 Descripción de componentes electrónicos y estructurales

Al hacer una implementación de un VANT son necesarios varios sistemas. Estos sistemas son: sistema estructural, sistema de propulsión, sistema de control, sistema de navegación y para esta aplicación se necesita un sistema de fumigación.

#### 1.4.8.1 Sistema estructural

La estructura mecánica o frame es el componente que contiene a los demás sistemas del VANT. Su peso y forma influyen en el diseño y en su vuelo. Como se muestra en la Figura 1.9 está conformado por: a) el cuerpo, b) los brazos y c) el tren de aterrizaje [2].

En el cuerpo tiene la función de albergar a los componentes electrónicos y sensores, sirviendo además de protección, En los brazos se ubican los motores para generar empuje y permitir la sustentación del VANT. El tren de aterrizaje es elemento que entra en contacto con el suelo al momento del aterrizaje [2].



Figura 1.9 Partes de la estructura mecánica [2]

#### 1.4.8.2 Sistema de propulsión

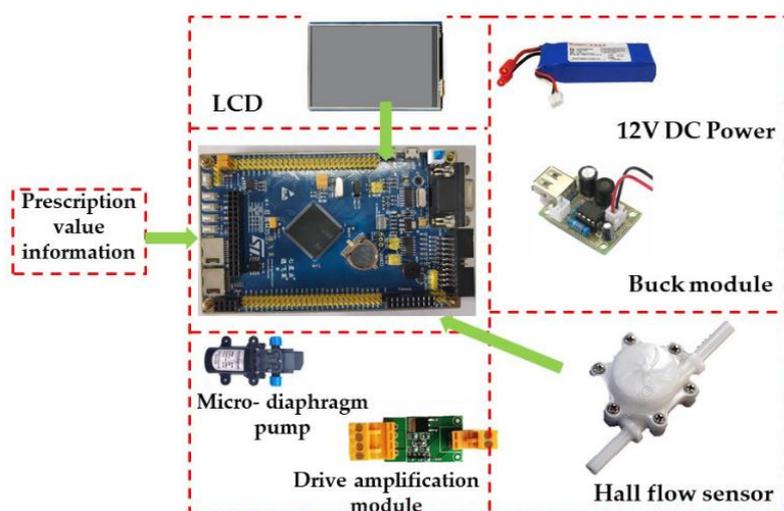
Es el encargado de proveer la fuerza necesaria para que el VANT deje el suelo y se suspenda en el aire. En la Tabla 1.3 se presentan los tipos de configuraciones de sistemas de propulsión en drones de ala rotatoria.

**Tabla 1.3 Sistemas de propulsión (Adaptado de [2])**

Tipo	Características
Tricóptero	Tienen una rápida respuesta, torque de motores no están equilibrados, inestables.
Cuadricóptero	Alta disponibilidad en el mercado, bajo costo.
Hexacóptero	Mayor potencia y estabilidad (comparado a las configuraciones previas).
Octacóptero	Mayor potencia y estabilidad.
Y6	Estructura similar a la del tricóptero, tiene dos motores por brazo.
X8	Similar a la estructura del cuadricóptero, tiene dos motores por brazo.

### 1.4.8.3 Sistema de fumigación

Permite el almacenamiento del pesticida en el dron, y su distribución en el cultivo. Compuesto de dos mecanismos: distribución y control. El primero consta de una bomba aspersion, mecanismo de apertura y cierre de válvulas, regulación de caudal. Y el segundo consta de la unidad de control que controla al primer mecanismo. En la Figura 1.10 se muestra el hardware empleado en un ejemplo de sistema de fumigación de caudal variable.



**Figura 1.10 Hardware empleado en un sistema de fumigación variable [24]**

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se presenta un análisis de las diferentes alternativas y criterios para la selección del VANT. Luego se procede con el diseño detallado del mismo.

### 2.1 Alternativas de solución

En esta sección se presentan las alternativas de VANT consideradas como posibles soluciones: ala fija, cuadricóptero, hexacóptero y octacóptero. Entre los criterios presentados, la capacidad de carga (factor determinante) y la autonomía de vuelo tienen mayor peso. Además, se analizó que su esquema o estructura permita *Vertical Take-Off and Landing* (VTOL).

Se busca un sistema de control medianamente complejo, y según la calificación final el modelo que mejor se adapta a los requerimientos es un hexacóptero. En la Figura 2.1 se presenta la matriz empleada en la selección.

	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	CRITERIO 4	CRITERIO 5	CRITERIO 7	CRITERIO 8	
Descripción	Capacidad de Carga	Autonomía de vuelo	Presencia de VTOL	Capacidad de permanecer fijos	Estabilidad	Facilidad de Pilotaje	Costo de fabricación	Total
Peso	10	7	6	6.5	5	3.5	2	40
	25.00%	17.50%	15.00%	16.25%	12.50%	8.75%	5.00%	100%
OPCIONES	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación	
Ala fija	10	10	0	0	1	1	2	4.6
Cuadricóptero	4	6	5	6	6	10	10	5.9
Hexacóptero	7	7	5	7	8	9	9	7.1
Octacóptero	8	4	5	8	9	8	5	6.8

Figura 2.1 Matriz de decisión para Modelo de VANT

## 2.2 Pasos seguidos en el diseño

Los diferentes pasos seguidos se ilustran en la Figura 2.2. Una vez identificado el problema, sus requerimientos y especificaciones técnicas, se procede a realizar el diseño y selección con los diferentes sistemas concluyendo con la integración de estos.

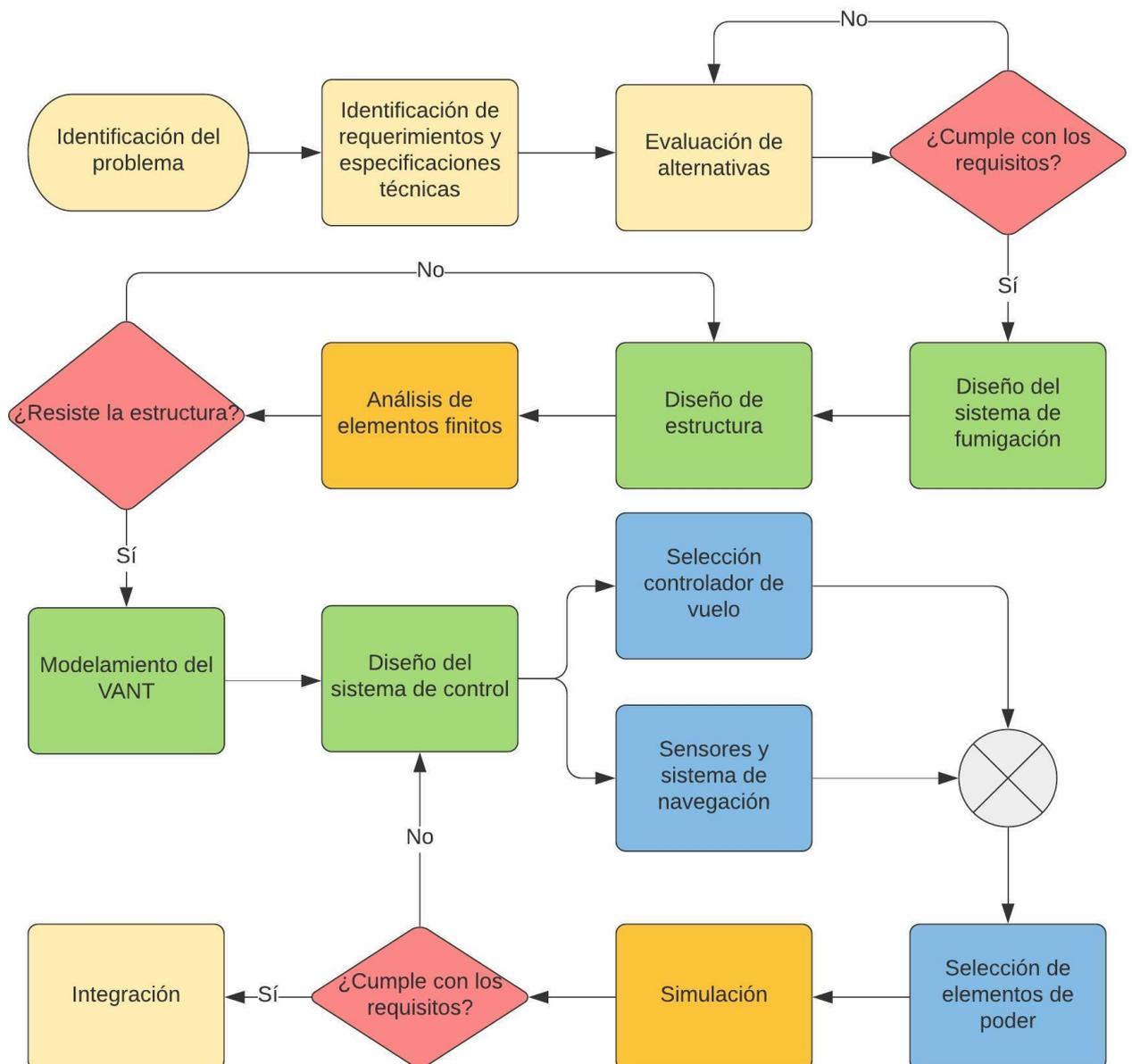


Figura 2.2 Metodología para el diseño del VANT

### 2.3 Requerimientos de diseño

A continuación, se presenta la Tabla 2.1 con los requerimientos considerados para el diseño mecánico, electrónico y para referenciar los cálculos.

**Tabla 2.1 Tabla con requerimientos**

<b>Criterio</b>	<b>Requerimiento</b>
Funciones	Fumigaciones en plantaciones de banano. Tiempo de vuelo apropiado para la tarea de fumigación. Minimizar contacto entre usuario y pesticida.
Empuje	Sistema de propulsión operado por motores
Compatibilidad	Con los pesticidas más utilizados en el cultivo de banano (Polvos solubles)
Energía	Sistema de alimentación de energía potente y Portátil
Materiales	Que incluya materiales de materiales de procedencia nacional.
Control	El control desde tierra por radio control
Costo	Similar a VANT disponibles en el mercado.
Seguridad	Seguro de operar.
Portabilidad	Fácil transportación
Impacto Ambiental	Que permita reducir el impacto ambiental de pesticidas. Uso eficiente de pesticidas.

## 2.4 Especificaciones técnicas

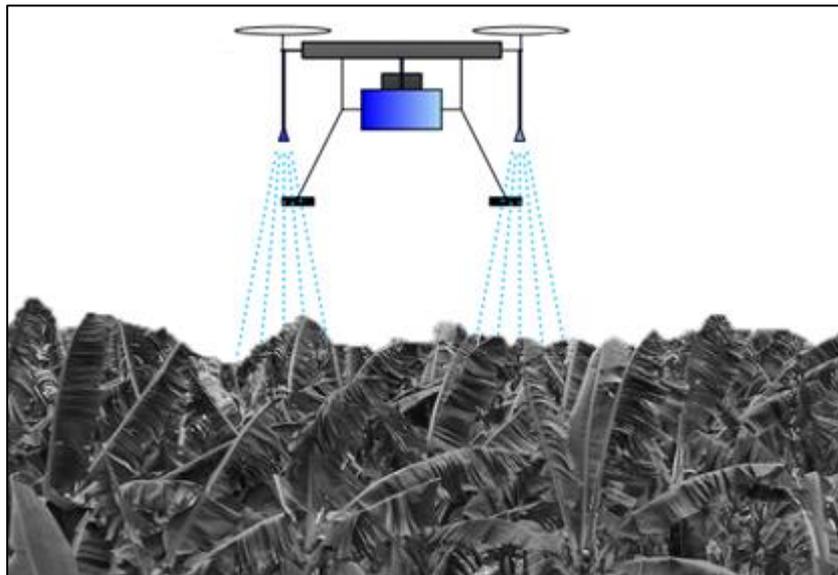
En esta sección se presenta, en la Tabla 2.2, las especificaciones técnicas. Las mismas que han sido desarrolladas en comparación con VANT en el mercado tanto nacionales como a nivel latinoamericano. Se incluyen datos como la autonomía (tiempo desde de despegue, fumigado y aterrizaje) y altura de vuelo, parámetros importantes en el diseño ya que del primero depende la cantidad fumigada y del segundo la potencia [23].

**Tabla 2.2 Especificaciones técnicas**

<b>Parámetros</b>	<b>Especificación</b>
Autonomía	De 20-30 minutos de vuelo
Altitud de vuelo (sobre el nivel del mar)	111 m
Altura de fumigación	Hasta 3 m sobre el cultivo
Presión de fumigación	Constante
Capacidad de pesticida	16 L
Diámetro de gota	40-70 $\mu\text{m}$
Modo de despegue	Vertical
Peso	Menor o igual a 45 kg
Carga útil	Aproximadamente 16 kg

## 2.5 Diseño conceptual

Se presenta en la Figura 2.3 el diseño conceptual de un VANT tipo hexacóptero, en vista frontal. En la que se identifican las partes principales, entre las que se destacan el sistema de fumigación formado por un tanque o reservorio, el sistema de propulsión por motores-hélices. También se muestra cómo se realizaría el proceso de fumigación, sobrevolando al cultivo de banano.



**Figura 2.3 Diseño conceptual hexacoptero de fumigación**

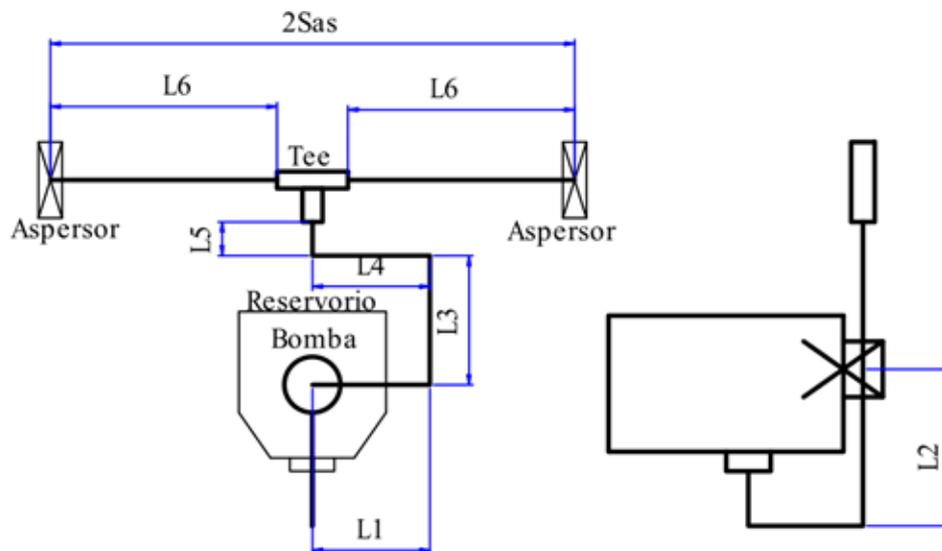
## 2.6 Diseño detallado

Para la selección de componentes del VANT, se tuvo en cuenta los requerimientos de diseño y comparación con modelos similares. Se presentan las opciones disponibles en el mercado y los criterios aplicados.

### 2.6.1 Sistema de fumigación

Compuesto por una bomba de agua, tanque de almacenamiento o reservorio, dos aspersores, manguera y un accesorio tipo "T". Se realizó un

esquema del sistema, mostrado en la Figura 2.4, con los componentes descritos anteriormente.



**Figura 2.4 Esquema sistema de fumigación**

Donde las longitudes desde L<sub>1</sub> hasta L<sub>6</sub> corresponde a la longitud empleada de la manguera y S<sub>as</sub> a la separación entre los aspersores.

El aspersor seleccionado deberá permitir un diámetro de gota entre 40 a 70 µm a una presión constante. La cantidad fumigada en la planta depende de la velocidad de vuelo, la presión y el caudal. El diámetro de gota depende de dos factores: presión y el tipo de boquilla.

Para calcular la presión se consideró el método de conservación de la energía aplicando la ecuación de Bernoulli con fricción (2.1)

$$P_1 + \alpha \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g Z_1 = P_2 + \alpha \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g Z_2 + \sum f \frac{l \rho V^2}{2D} + \sum K_L \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.1)$$

donde P<sub>1</sub> es la presión en la bomba, P<sub>2</sub> es la presión en los aspersores, α es el coeficiente de corrección cinemático, ρ es la densidad del pesticida, Z<sub>1</sub> es la altura en la bomba, Z<sub>2</sub> es la altura en los aspersores, ∑ K<sub>L</sub> es la suma de

factores de pérdida por los accesorios,  $f$  es el coeficiente de fricción viscosa,  $V_x$  es la velocidad del fluido.

Para determinar  $f$ , se emplea el diagrama de Moody, el mismo que está en función del número de Reynolds obtenido con la ecuación 2.2 y la rugosidad relativa  $\varepsilon$  según la ecuación 2.3

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d} \quad (2.3)$$

donde  $\nu$  es la viscosidad del agua,  $d$  es el diámetro interno de la tubería y  $\Delta$  es la rugosidad absoluta.

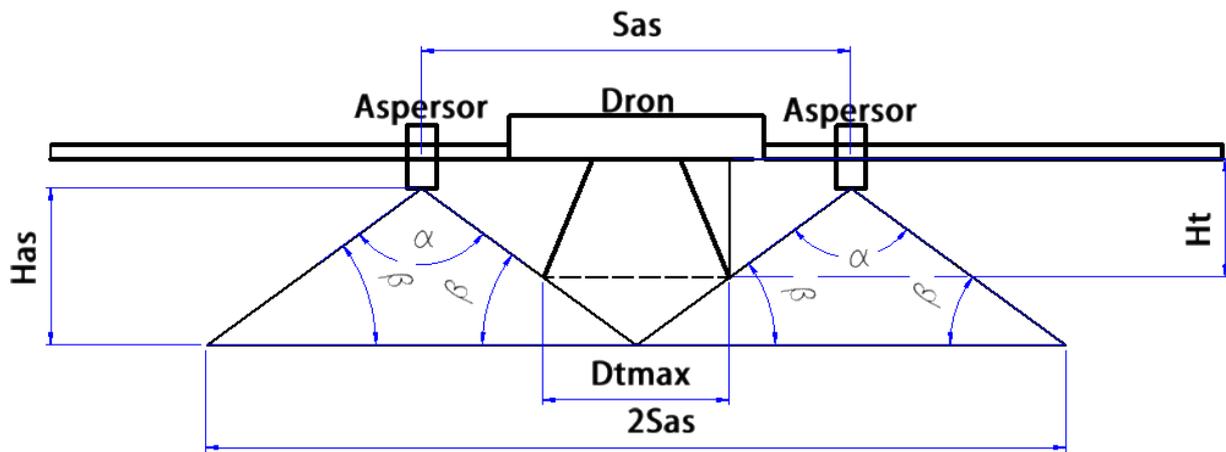
En la Tabla 2.3 se presentan los valores utilizados para los cálculos de presión para el sistema de fumigación. Se obtuvo como resultado una presión de 0.1 MPa.

**Tabla 2.3 Parámetro del sistema de fumigación**

$P_1$	0.2*10 <sup>6</sup> [Pa]
$Z_1$	0 m
$Z_2$	0.9 m
$K_L$	1.5
$d$	0.020 m
Q2	0.90 (0.45 por boquilla) L/min
$\varepsilon$	0.00000575 m (promedio 0.0015X10 <sup>-3</sup> y 0.01X10 <sup>-3</sup> ).
$l$	2.5 m

En la Figura 2.5. se muestra la relación existente entre  $S_{as}$  y el área cubierta, la cual depende además del ángulo de aspersion  $\alpha$  (definido por el fabricante) la altura de aspersion  $H_{as}$ .

También se incluye en la imagen el ángulo  $\beta$ , el cual indica que el triángulo obtenido por cono recto es isósceles y la relación entre las dimensiones del tren de aterrizaje, el ancho no podrá superar una distancia máxima  $Dt_{max}$ .

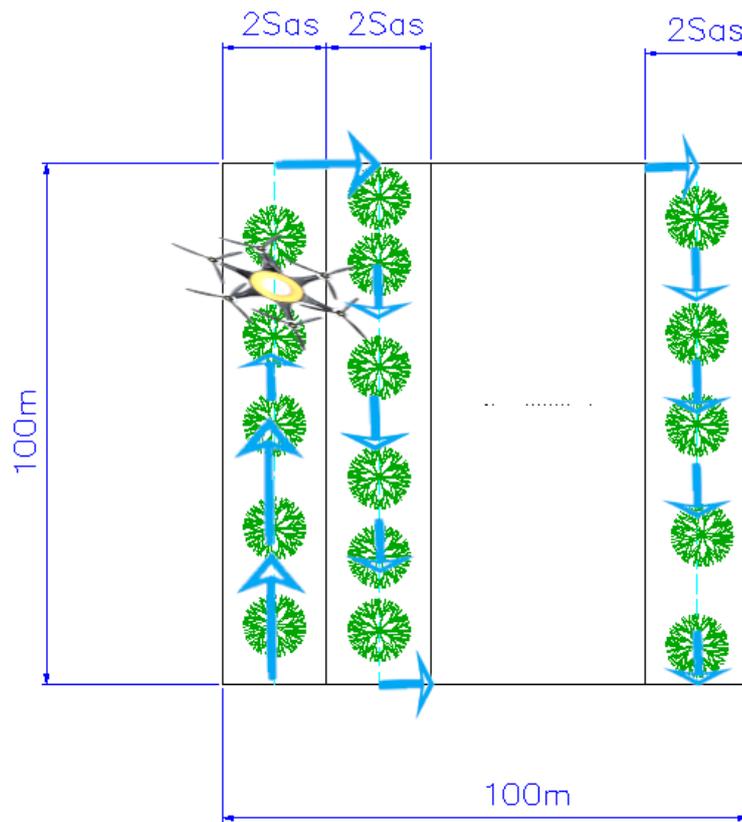


**Figura 2.5 Ubicación de los aspersores en el dron**

Para el cálculo del tiempo requerido para fumigar una Hectárea, se considera la separación del ancho de cobertura de fumigación es  $2 S_{as}$ , según la Figura 2.6, la velocidad de vuelo ( $v$ ) la cual se considera 6 m/s. En la Figura se muestra un área de un cuadrado de 100 m de lado, el VANT deberá barrer la superficie  $n$  veces. Obteniendo que  $2S_{as}n = 100 m$  y la relación 2.4

$$T_{Ha} = \frac{100n}{60v} + \frac{2S_{as}(n-1)}{60v} [min/Ha] \quad (2.4)$$

donde el primer término corresponde al tiempo de vuelo paralelo a una dirección del cuadrado y el otro termino a la dirección restante. Así, por ejemplo, al iniciar el vuelo el dron recorre a lo largo del cuadrado, gira y avanza de manera horizontal una distancia  $S_{as}$  y luego gira realizando esto un total de  $n$  -veces.



**Figura 2.6 División del terreno según las pasadas de vuelo.**

Según la ecuación 2.4 el tiempo de vuelo es proporcional a  $n$  e inversamente proporcional a  $S_{as}$ , por lo que esta distancia debe ser la mayor posible. Se considero ubicarlos debajo los motores, donde la separación es mayor.

### 2.6.1.1 Masa de los componentes del sistema de fumigación

Para los cálculos siguientes se requiere conocer la masa de sus componentes, el pesticida es soluble en agua y su masa se obtiene a partir de la densidad de esta. Con la ecuación (2.5) se obtiene la masa total.

$$M_{Total} = M_{tanque} + M_{bomba} + M_{boquillas} + M_{manguera} + M_{driver} + M_{H_2O} \quad (2.5)$$

Reemplazando valores se obtiene una masa  $M_{Total} = 18.101 \text{ Kg}$ .

## 2.6.2 Diseño de la estructura

Se partió del análisis estático de la estructura del dron. En la Figura 2.7 se muestra el Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) del VANT cuando está en vuelo. Las fuerzas que aparecen son peso  $W_d$ , el peso del reservorio  $W_r$ , la resistencia del aire  $R_a$ , la fuerza de empuje de los motores  $F_m$ . El tanque se ubica por debajo de la base del VANT. Para distribuir el peso correctamente en el tren de aterrizaje se consideró 4 patas en la estructura.

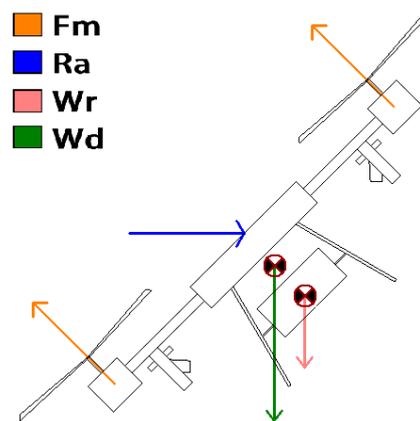


Figura 2.7 DCL del dron en vuelo

En la Figura 2.8 se muestra cómo se relaciona una pata con el resto de la estructura, se considera que actúa  $0.25 \cdot W_r$  en el punto de apoyo del reservorio ubicado a una distancia  $l_t$  del extremo superior de la pata la cual tiene una longitud total  $L_t$ . El ángulo  $\theta$  entre el soporte y la pata, y  $\varphi$  es el ángulo de vuelo respecto a la horizontal. El tren de aterrizaje se une a la base por una junta las cuales generan las reacciones  $R_{rx}$  y  $R_{ry}$

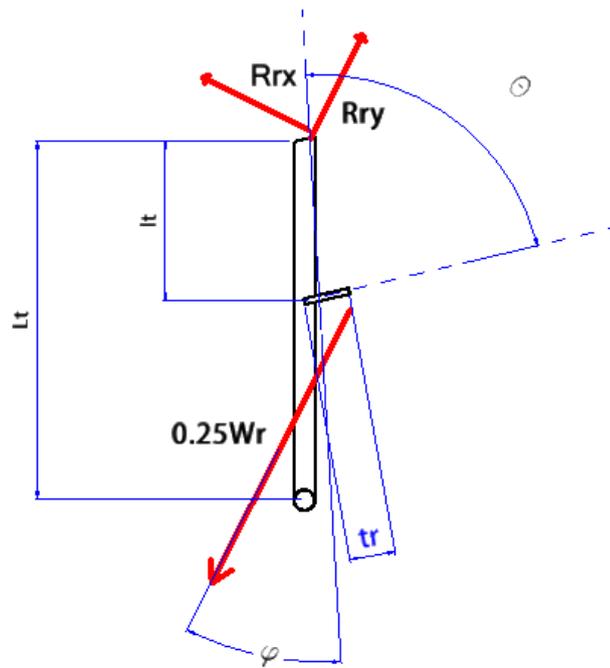


Figura 2.8 DCL barra del tren de aterrizaje

Para la base y placa superior del VANT se empleó una forma hexagonal por contener menor área que la de un círculo. En la Figura 2.9 se muestra el DCL de la base inferior del hexacóptero. Se considera que un motor transmite una fuerza igual a  $F_m/6$  y además transmite un momento, se utilizan pernos para unir la base y tren de aterrizaje.

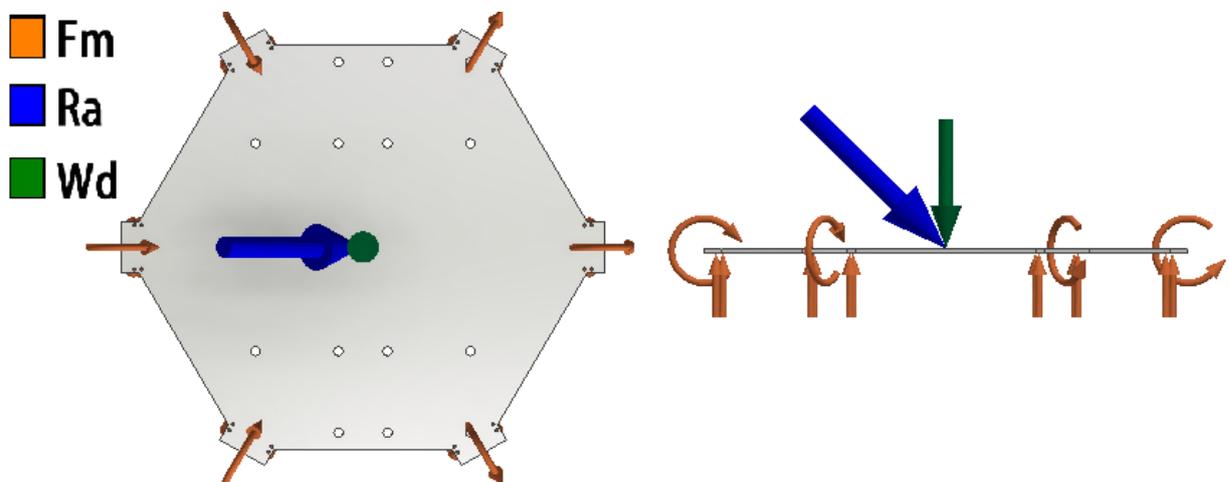


Figura 2.9 DCL de la base

### 2.6.2.1 Selección del material en la estructura

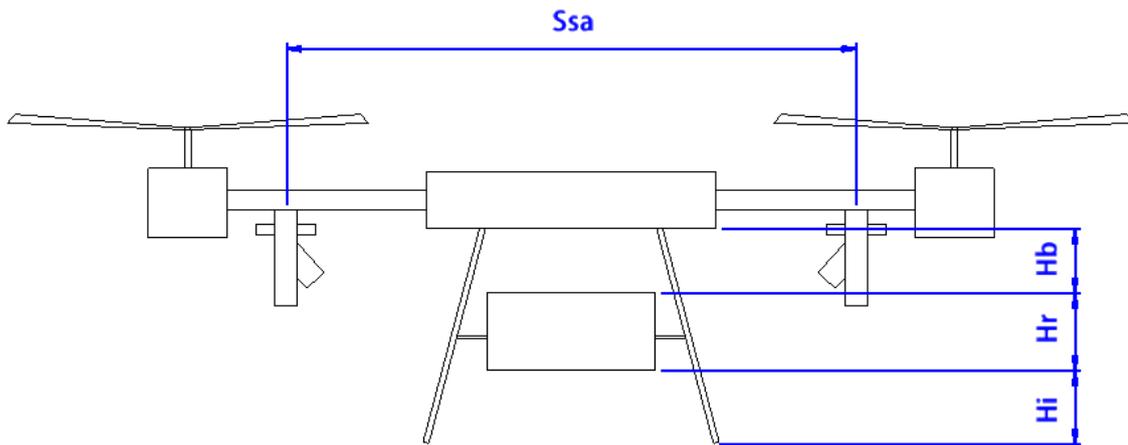
El material por seleccionar debe tener una relación peso-resistencia baja. Por lo que se consideraron tres opciones para la estructura del VANT: Aluminio 6005, Aluminio 7075 y Fibra Carbono. A continuación, se muestra en la Tabla 2.4 una comparación entre ambos.

**Tabla 2.4 Comparación entre fibra de carbono y aluminio 7075**

<b>Características</b>	<b>Fibra de carbono</b>	<b>Aluminio 7075</b>	<b>Aluminio 6005</b>
<b>Resistencia última a la tensión [MPa]</b>	3500 (valor promedio)	276	250
<b>Densidad [kg/m3]</b>	1 750	2 823.35	2 700
<b>Masa obtenida en dron [kg]</b>	27	43.56	-
<b>Disponibilidad en el país</b>	Importado	Disponibile	Disponibile
<b>Disponibilidad de fábricas que maquinen el material</b>	Casi nula	Disponibile	Disponibile

La fibra de carbono presenta ventajas como una mayor resistencia a la tracción, y una densidad mucho menor. En Ecuador pocas empresas son las que trabajan con este material. Además, su costo de adquisición es elevado. Por lo que se considera trabajar con Aluminio 7075, con ventajas de disponibilidad y su precio. En Ecuador los comercializan empresas como IVAN BOHMAN, ACEROS INDUSTRIALES HGB [25]. El aluminio 6005 presenta características similares a 7075, y se usara para los tubos de los brazos.

En la Figura 2.10 se muestran las dimensiones consideradas: la longitud total depende de la altura del reservorio  $H_r$ , altura de las baterías  $H_b$  ubicadas, sobre el tanque una holgura inferior  $H_i$  y de la longitud de los tubos empleado en los brazos.



**Figura 2.10 Dimensiones consideradas para el VANT**

### 2.6.3 Diseño del sistema de control

En el apéndice A se describe el proceso para definir los sistemas de referencia utilizados, y las conversiones para el modelamiento del hexacóptero. Se consideró la representación en cuaternios para el modelo del VANT y ángulos de Euler para el controlador.

#### 2.6.3.1 Modelamiento del sistema

El movimiento de un cuerpo rígido puede ser descompuesto en movimiento de traslación y rotación [26]. Se analizó la dinámica traslacional. Aplicando la segunda ley de Newton tenemos la ecuación 2.6

$$m \dot{V}_B + v \times (m V_B) = R^T G + T \quad (2.6)$$

donde  $R^T G$  es la fuerza gravitacional y  $G$  es la aceleración de la gravedad en forma de vector,  $G = [0 \ 0 \ -g]^T$ .

La fuerza centrífuga se anula debido a la distribución de los pares, teniendo la ecuación 2.7.

$$m \ddot{\xi} = G + R^T T \quad (2.7)$$

representada con cuaternios se tiene la ecuación 2.8

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{T}{m} \begin{bmatrix} 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Para la dinámica rotacional, se define el torque externo como  $\tau_B = [\tau_\phi \ \tau_\theta \ \tau_\psi]^T$ . Esto a su vez es igual a la suma de la aceleración angular debido a la inercia ( $I_b \dot{v}$ ), las fuerzas centrípetas  $v \times (I_b v)$ , y la fuerza giroscópica ( $\tau_{giroscopio}$ ) [26].

$$\tau_B = I_b \dot{v} + v \times (I_b v) + \tau_{giroscopio} \quad (2.9)$$

Con manipulación algebraica la ecuación 2.9 puede ser escrita como la ecuación 2.10

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(I_{yy} - I_{zz})qr}{I_{xx}} \\ \frac{(I_{zz} - I_{xx})pr}{I_{yy}} \\ \frac{(I_{xx} - I_{yy})pq}{I_{zz}} \end{bmatrix} - I_r \begin{bmatrix} q \\ \frac{I_{xx}}{-p} \\ I_{yy} \\ 0 \end{bmatrix} \bar{w} + \begin{bmatrix} \frac{\tau_\phi}{I_{xx}} \\ \tau_\theta \\ \frac{\tau_\psi}{I_{zz}} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Con esta ecuación se puede evaluar la velocidad angular. La aceleración angular se la puede obtener con la siguiente expresión.

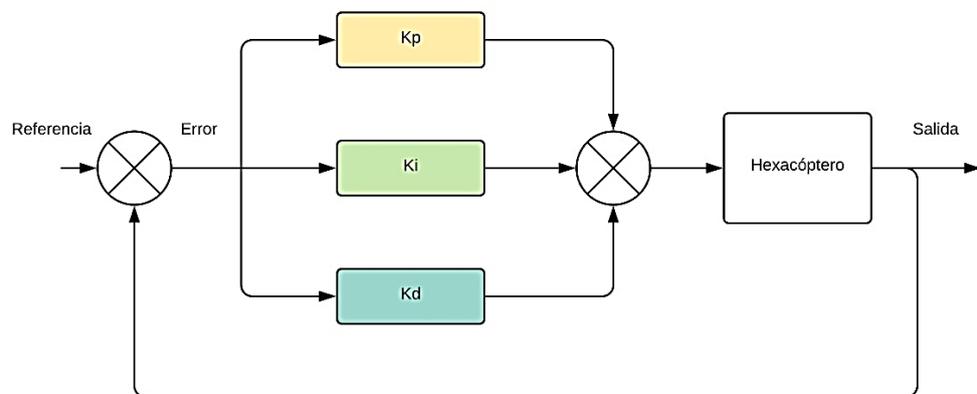
$$\ddot{q}_u = \frac{d}{dx}(Sv) \quad (2.11)$$

Finalmente se define la dinámica total del hexacóptero mediante las ecuaciones 2.12 de la dinámica traslacional y la dinámica rotacional

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{T}{m} \begin{bmatrix} 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \\ \ddot{q}_u = \frac{d}{dx}(Sv) \end{cases} \quad (2.12)$$

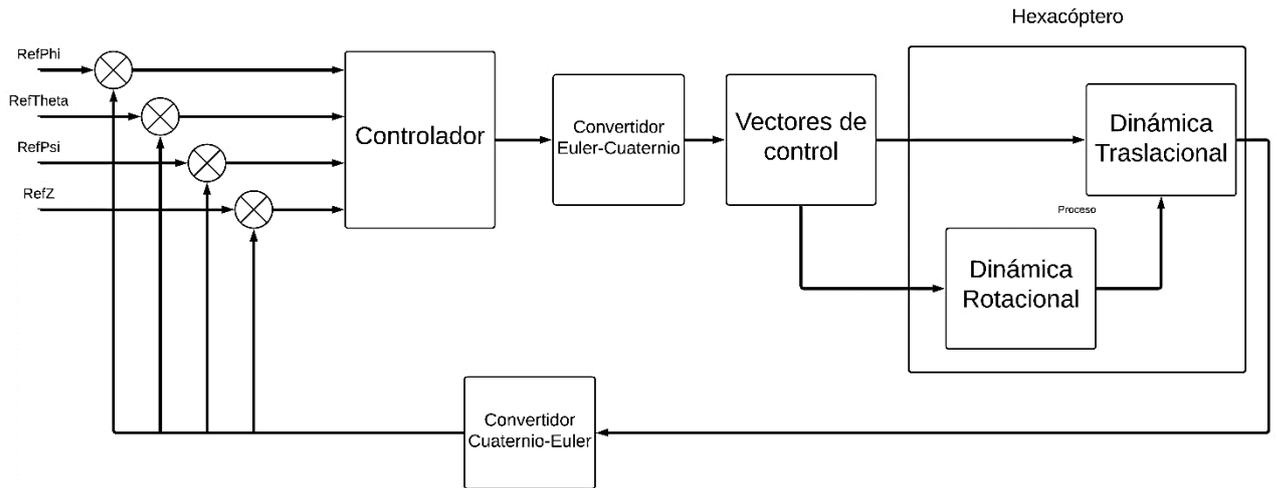
### 2.6.3.2 Ecuaciones de control

Luego de obtener el modelo matemático, se aplica las ecuaciones de un control PID. En este trabajo se diseñarán controladores para la altitud y orientación. En la Figura 2.11 se presenta el diagrama de bloques del controlador PID aplicado a cada una de las ecuaciones del modelo matemático del VANT. En el control PID, el termino P (Proporcional) determinar la rapidez de respuesta del sistema. El termino I, ejecuta la acción de control basándose en la acumulación del error en el tiempo, por último, el termino D, ejecuta una acción de control predictiva basándose en la tasa de cambio de la variable de control en el tiempo.



**Figura 2.11 Esquema de controlador PID**

En la Figura 2.12 se presenta el diagrama simplificado de la estrategia de control del VANT. En el bloque Controlador se encuentran las ecuaciones 2.12 hasta 2.16. que son la aplicación de las leyes de control al modelo del hexacóptero.



**Figura 2.12 Diagrama del sistema de control de altitud y orientación**

$$U_1 = K_{p,z}(z_d - z) + K_{d,z}(\dot{z}_d - \dot{z}) + k_{i,z} \int (z_d - z)dt \quad (2.13)$$

$$U_2 = K_{p,\phi}(\phi_d - \phi) + K_{d,\phi}(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + k_{i,\phi} \int (\phi_d - \phi)dt \quad (2.14)$$

$$U_3 = K_{p,\theta}(\theta_d - \theta) + K_{d,\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + k_{i,\theta} \int (\theta_d - \theta)dt \quad (2.15)$$

$$U_4 = K_{p,\psi}(\psi_d - \psi) + K_{d,\psi}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + k_{i,\psi} \int (\psi_d - \psi)dt \quad (2.16)$$

En las ecuaciones anteriores  $U_1$  es la señal de control para la altitud.  $U_2$ ,  $U_3$  y  $U_4$  son las señales de control para la orientación [27]. Y  $K_p$   $K_i$   $K_d$  son las constantes proporcional, integral y derivativa de cada controlador.

#### 2.6.4 Cálculos de Potencia

Para el cálculo de potencia se utilizó la TCM con un factor de mérito, ya que no toma en cuenta la geometría de la hélice. La potencia depende de la altitud en la que se va a operar [23].

Se considera una altitud promedio de la costa de 100 m, el cultivo de banano tiene una altura promedio entre 3.5 y 7.5 metros [28], el proceso de

fumigación no debe pasar los 3 metros sobre el cultivo, la altura de operación del dron se expresa mediante la ecuación 2.17.

$$h = \text{altitud} + h_{\text{Cultivo}} + h_{\text{SobreCultivo}} \quad (2.17)$$

Obteniendo la altura de trabajo 111 m. Luego se calcula la densidad del aire, se hace una estimación a partir del Modelo de atmosfera Estándar ISA, mediante la expresión 2.18:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - \frac{0.0065h}{T_0} \right)^{5.2561} \quad (2.18)$$

donde  $\rho_0$  representa la densidad del aire a 0 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar), y tiene un valor de  $1.225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ,  $T_0$  es la temperatura de  $15^\circ\text{C}$  y  $h$  es la altura a la que va a opera el VANT. Reemplazando se obtiene  $\rho = 1.209 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ .

Los motores deben generar un empuje mínimo igual al peso del VANT incluyendo la carga. Este valor es 42.05 Kgf, se redondeó a 45 Kgf (441 N), dato que se obtuvo del modelo virtual en Inventor. Utilizando la ecuación 2.19 se obtiene el empuje de un motor.

$$T_{\text{motor}} = \frac{M_{\text{total}} * g}{6} \quad (2.19)$$

Se obtiene  $T_{\text{motor}} = 73.5 \text{ N}$ , que es el valor mínimo para equilibrar el peso del VANT.

Se recomienda realizar el diseño de la hélice en base a pruebas de laboratorio. Como no se tienen esos datos se seleccionó un diámetro basado en recomendaciones del fabricante. Los valores de la hélice seleccionada son 30.2" de diámetro y un avance de 9.9", en la Figura 2.13 se muestra las hélices seleccionadas.



**Figura 2.13 Hélices 30.2X9.9 [29]**

Se consideran cuatro modos de desplazamiento que son: vuelo a punto fijo, vuelo ascendente, vuelo descendente y vuelo horizontal. Se calculará la potencia para cada uno para determinar qué movimiento es el más crítico.

#### **2.6.4.1 Potencia en vuelo a punto fijo.**

En este movimiento se asume que la velocidad relativa entre las hélices y el aire es cero. Para determinar la potencia requerida en vuelo a punto fijo primero se debe calcular la velocidad inducida en el motor  $v_{io}$ , mediante la ecuación 2.20:

$$v_{io} = \sqrt{\frac{T_{motor}}{2\rho A}} \quad (2.20)$$

donde  $A$  es el área que se genera al rotar la hélice. Y se puede calcular con la ecuación 2.21 donde  $r$  es el radio de la hélice.

$$A = \pi r^2 \quad (2.21)$$

Realizando los cálculos y conversión se obtiene  $A = 0.461 \text{ m}^2$ . Reemplazando este valor en 2.20 se obtiene  $v_{io} = 8.1103 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Según la TCM

[23], la potencia requerida para realizar vuelo a punto fijo se obtiene con la ecuación 2.22

$$P_{io} = T_{motor} v_{io} \quad (2.22)$$

obteniendo una potencia  $P_{io} = 596.1064 \text{ W}$

#### 2.6.4.2 Potencia en vuelo axial ascendente

En este movimiento aparece una velocidad relativa entre la hélice y el aire, añadiendo el termino  $v_c$  a la ecuación 2.22. Se considero  $v_c = 6 \frac{m}{s}$  tomando en cuenta el tamaño del VANT y la carga que se le aplicará. La potencia en vuelo axial ascendente queda expresada en la ecuación 2.23.

$$P_i = T * (v_c + v_i) \quad (2.23)$$

Según la TCM, existe una relación entre la velocidad inducida en el motor de vuelo a punto fijo con velocidad inducida en el motor de vuelo axial ascendente, definida en la ecuación 2.24.

$$\frac{v_i}{v_{io}} = -\frac{1}{2} * \left(\frac{v_c}{v_{io}}\right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{v_c}{v_{io}}\right)^2 + 1} \quad (2.24)$$

Reemplazando valores y despejando se obtiene  $v_i = 5.6474 \frac{m}{s}$ . Utilizando 2.25 se calcula la potencia en vuelo axial ascendente, obteniendo  $P_i = 856.0809 \text{ W}$ .

### 2.6.4.3 Potencia en vuelo axial descendente

Primero se consideran cuatro regímenes de trabajo [30]:

- Funcionamiento normal  $v_c \geq 0$  (vuelo ascendente)
- Anillos de vórtices  $-1 \leq \frac{v_c}{v_{io}} < 0$
- Estela turbulenta  $-2 \leq \frac{v_c}{v_{io}} < -1$
- Molinete frenante  $\frac{v_c}{v_{io}} < -2$

Para los siguientes cálculos se considera una velocidad de vuelo axial descendente de  $3 \frac{m}{s}$ . Se determina que el régimen de trabajo es  $\frac{v_c}{v_{io}} = -0.3699$ , cayendo el análisis en el segundo régimen donde la TCM no es válida por ello se realiza una compensación lineal con la ecuación 2.25 correspondiente a este régimen. En la Figura 2.14 se muestra la relación entre las velocidades.

$$\frac{v_i}{v_{io}} = k - \frac{v_c}{v_{io}} \quad -1.5 \leq \frac{v_c}{v_{io}} \leq 0 \quad (2.25)$$

donde  $k$  es el factor de compensación,  $k = 1$  para hélices ideales,  $k = 1.15$  para caso real. Aplicando la ecuación 2.25 se obtiene  $v_i = 12.32 \frac{m}{s}$ . Para obtener la potencia se aplica la ecuación 2.23 y se obtiene  $P_{id} = 685.52 W$ .

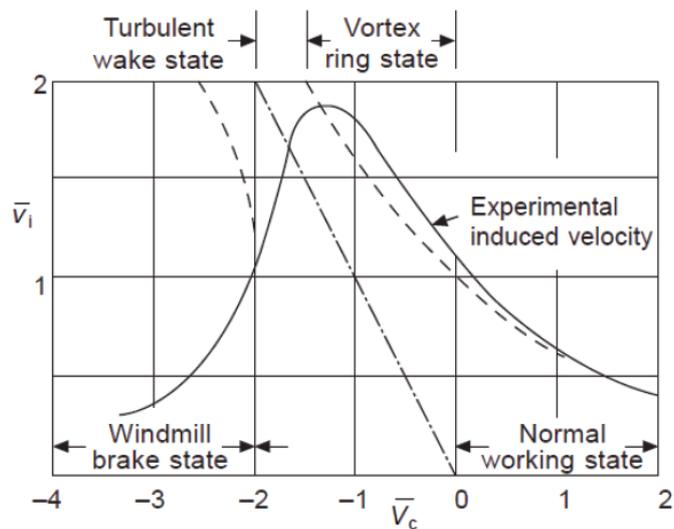


Figura 2.14 Variación de la velocidad inducida en vuelo descendente [23]

#### 2.6.4.4 Potencia en vuelo de avance horizontal

Este es el movimiento con el que se realiza el proceso de fumigación. Se obtiene la velocidad de avance máxima en los motores con la ecuación 2.26

$$P * Fm = 2\rho Av_i \sqrt{(v_a \cos \alpha_r)^2 + (v_a \sin \alpha_r + v_i)^2} (v_a \sin \alpha_r + v_i) \quad (2.26)$$

donde  $\alpha_r$  es el ángulo de ataque de la hélice y  $v_a$  es la velocidad de avance máxima. Para encontrar la  $v_i$  se aplica la ecuación 2.27.

$$v_i = v_{io} * \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{4 + \left(\frac{v_a \cos \alpha_r}{v_{io}}\right)^4} - \left(\frac{v_a \cos \alpha_r}{v_{io}}\right)^2 \right]} \quad (2.27)$$

Aplicando las dos ecuaciones anteriores se obtiene  $v_a = 2 \text{ m/s}$ . La potencia en vuelo de avance horizontal se obtiene con la ecuación 2.28.

$$P_a = T(v_a \sin \alpha_r + v_i) \quad (2.28)$$

Reemplazando valores se obtiene que la potencia requerida para este movimiento es  $P_a = 891.79 \text{ W}$ .

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

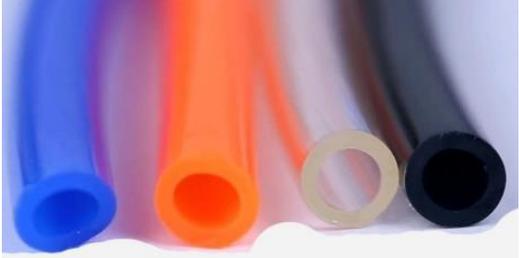
En este capítulo se presentan los componentes seleccionados para el sistema de fumigación, el modelado 3D en Autodesk Inventor, los componentes seleccionados para el sistema de fumigación, el sistema de control y sensores para la integración del VANT.

### 3.1 Sistema de fumigación

La Tabla 3.1 muestra los componentes seleccionados del sistema de fumigación, con una breve descripción.

**Tabla 3.1 Componentes del sistema de fumigación [31] - [33]**

Componente	Descripción	Imagen
Tanque para el pesticida	Almacén del pesticida para el proceso de fumigación. Posee una masa 1.35 Kg.	
Bomba de diafragma	Su función es suministrar un caudal regulado a una presión determinada. 0.047 kg.	

<p>Boquillas pulverizadoras</p>	<p>Son las encargadas de pulverizar el pesticida para rociarlo en el cultivo.</p>	
<p>Manguera</p>	<p>Son los conductos por donde se desplaza el pesticida.</p>	
<p>Unión tipo T</p>	<p>Bifurcación desde la bomba a las boquillas pulverizadoras.</p>	

En la Figura 3.1 se muestra un esquema con las conexiones del sistema de fumigación. Se disponen un tanque de almacenamiento, una bomba de diafragma, un controlador de la bomba, una T y las boquillas pulverizadoras.



**Figura 3.1 Esquema del sistema de fumigación**

Los resultados del sistema de fumigación se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Parámetros de funcionamiento del sistema de fumigación**

Parámetros	Valor
Tiempo por Hectárea	9.06 min/ha
Tiempo de vaciado	17.78 min/tanque
Flujo por aspersor	0.45 L/min
Capacidad por Tanque	2.4 ha/tanque.

### 3.2 Análisis de la base y del brazo de soporte de motor

A continuación, se muestra, los resultados obtenidos en la simulación (Figura 3.2 y Figura 3.3) para el tubo que sostiene los motores. Se utilizó la ecuación 3.1 considerando un análisis estático para obtener la expresión y como se mencionó en la sección 2.6.2 se considera la fatiga al trabajar con la resistencia a la fatiga del Aluminio 6005. Se consideró  $\varphi = 45^\circ$  obteniendo que la fuerza  $F_m$  es de 100.71 N. Se obtuvo un esfuerzo máximo a la tracción (Von Mises) de 41.82 MPa, lo que nos da un factor de seguridad (Fs) de 2.39, Y la elongación máxima de 1.45 mm.

$$F_m = \frac{W_T}{6 \cos \varphi} \quad (3.1)$$

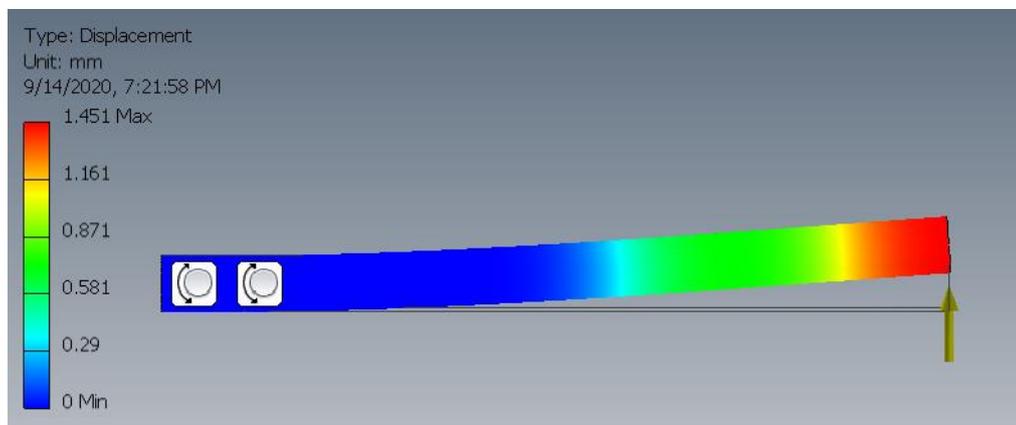


Figura 3.2 Resultados obtenidos en la simulación, Desplazamiento.

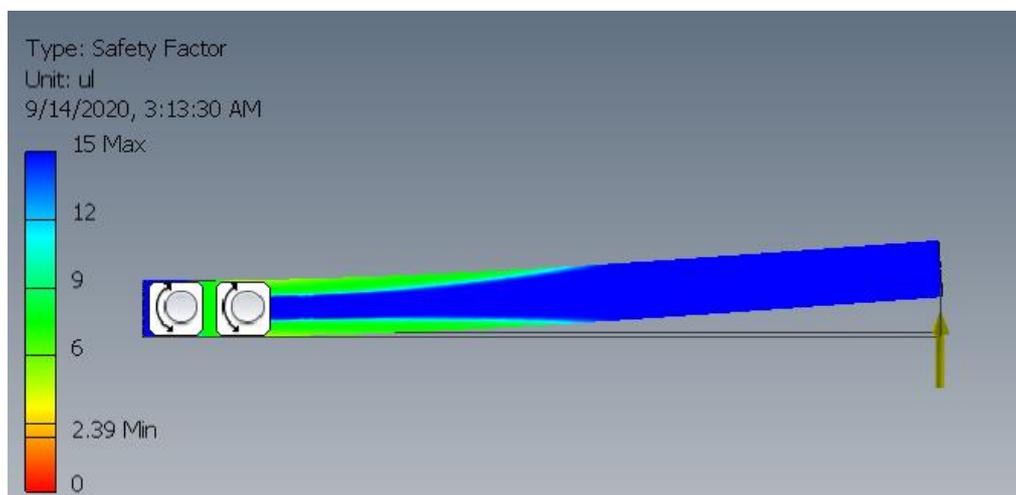


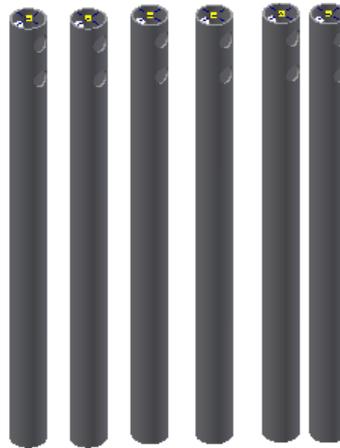
Figura 3.3 Factor de seguridad obtenido en el brazo.

Las características del perfil de aluminio seleccionado se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Especificaciones del perfil seleccionado**

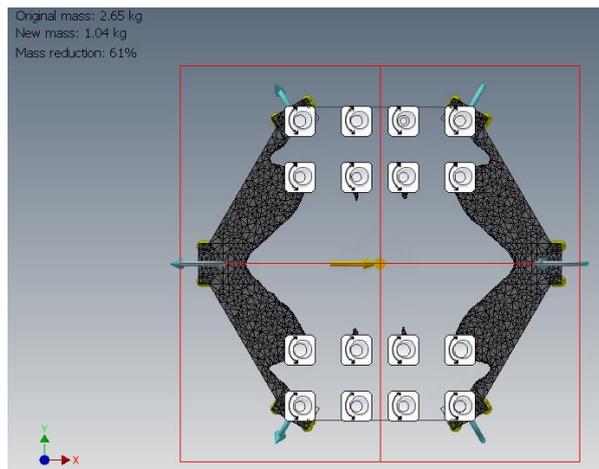
Diámetro exterior	32 mm
Espesor	2 mm
Longitud	446 mm
Diámetro para pernos	16 mm
Referencia (según fabricante)	1254

El catálogo de selección se muestra en el APÉNDICE C. Con un total de 6 tubos de Aluminio 6005 -Figura 3.4- esto suman 1.42 kg.



**Figura 3.4 Total tubos empleados en brazos (Al 7075)**

La base elemento importante de la estructura (ya que a esta están unidos la mayoría de los componentes). Su simulación se consideró en dos etapas: en primer lugar se buscó que la geometría propuesta sea capaz de soportar las cargas que sobre ella actúan, luego se buscó optimizar esta forma, es decir, se realizó remoción de material u optimización topológica con el objetivo de reducir su peso sin afectar considerablemente su capacidad de carga, esto se muestra en la Figura 3.5. Partiendo de una masa de 2.65Kg a una de 2.07 kg lo que se traduce en una optimización del 22%.



**Figura 3.5 Optimización topológica de la base del dron**

La Tabla 3.4 muestra una comparación entre los resultados obtenidos y el diseño inicial, al final se agregó un nervio longitudinal se aumentó el espesor en los vértices y se removió material.

**Tabla 3.4 Comparación diseño inicial vs diseño final**

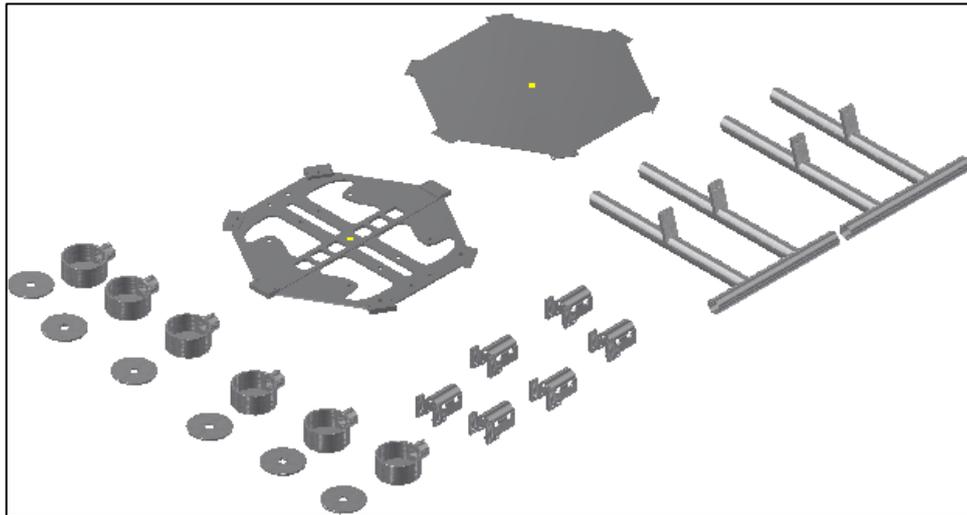
	Diseño Inicial	Diseño final
Esfuerzos de Von Mises	Type: Von Mises Stress Unit: MPa 9/18/2020, 3:16:33 AM 227.7 Max 182.2 136.6 91.1 45.6 0 Min	Type: Von Mises Stress Unit: MPa 9/14/2020, 10:41:21 PM 60.54 Max 48.44 36.33 24.23 12.13 0.03 Min
Desplazamiento	Type: Displacement Unit: mm 9/18/2020, 3:22:57 AM 2.002 Max 1.602 1.201 0.801 0.4 0 Min	Type: Displacement Unit: mm 9/14/2020, 10:43:38 PM 1.106 Max 0.885 0.664 0.442 0.221 0 Min

La Tabla 3.5 se presenta los cambios en la base con sus factores de seguridad.

**Tabla 3.5 Comparación entre inicial y final de la base del dron**

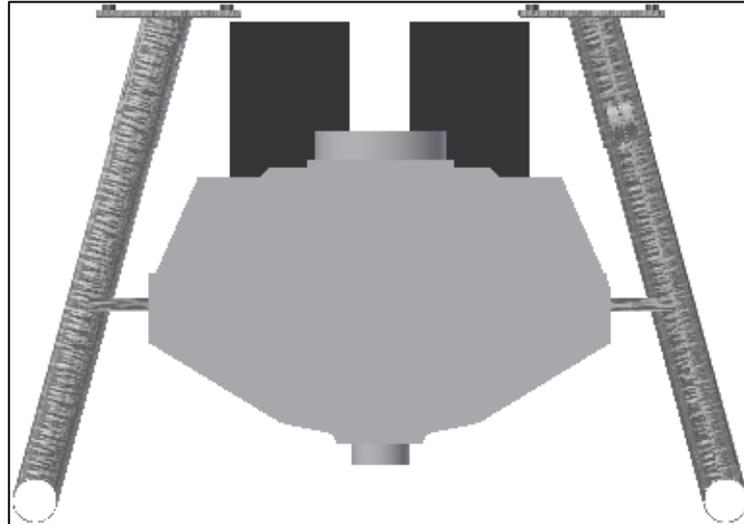
	Diseño Inicial	Diseño final
Factor de seguridad		
Geometría		

En la Figura 3.6 se muestran los elementos diseñados con Aluminio 7075 (toda la estructura a excepción de los elementos de unión y los tubos de los brazos) dando una masa de 7.7kg.



**Figura 3.6 Componentes a fabricarse con Al 7075**

Como se observa en la Figura 3.7 el diseño del tren de aterrizaje cumple con el criterio descrito. Y además no intercepta con los brazos del dron una vez plegado.



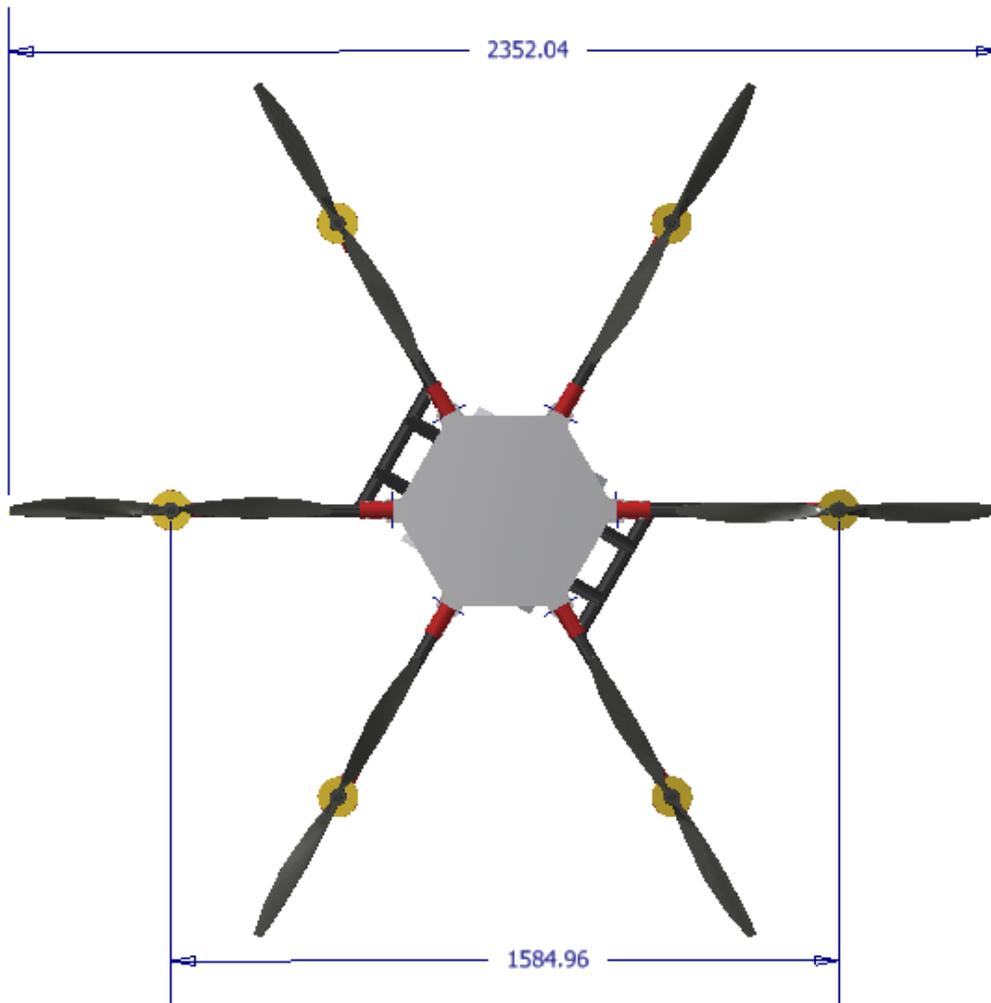
**Figura 3.7 Configuración geométrica entre el reservorio y tren de aterrizaje**

El modelo 3D del VANT tipo hexacóptero obtenido se muestra en la Figura 3.8.



**Figura 3.8 Dron vista isométrica**

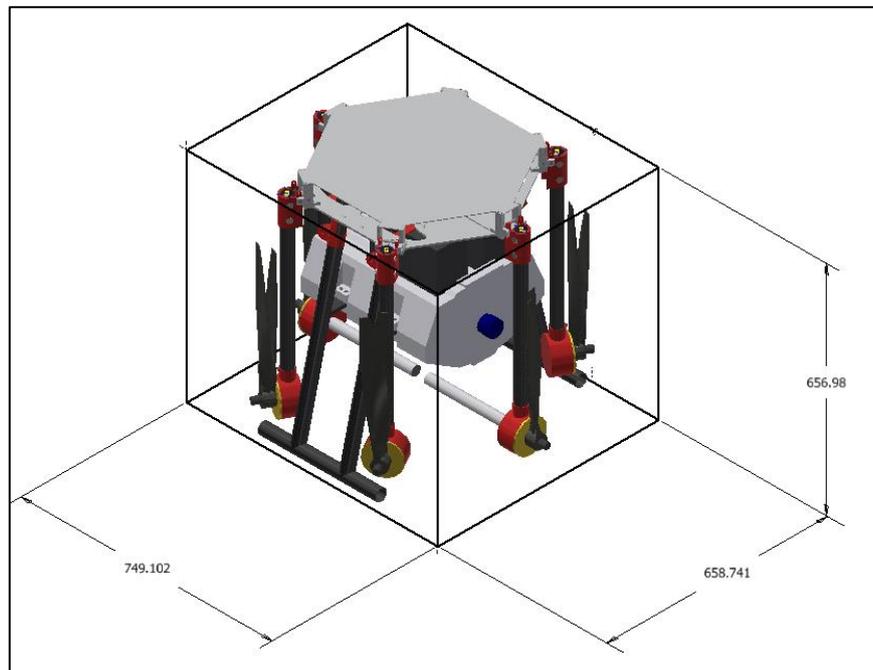
En la Figura 3.9 se observa que la longitud máxima del dron desplegado (de hélice a hélice), sus dimensiones corresponden a 2352.4 mm y la distancia entre motores colineales (equivalente a  $S_{as}$ ) es de 1584.96 mm.



**Figura 3.9 Vista superior del Hexacóptero**

En el apéndice E se encuentra los planos de varias piezas generadas en el software Autodesk Inventor.

Además, las dimensiones del hexacóptero plegado son de 749 mm de largo, 659 mm de ancho y 657 mm de alto, esto se muestra en la Figura 3.10. Su capacidad de carga es de 17 kg, peso del equipo sin carga: 26 kg y máximo peso de despegue: 43 kg (ver Figura 3.11).



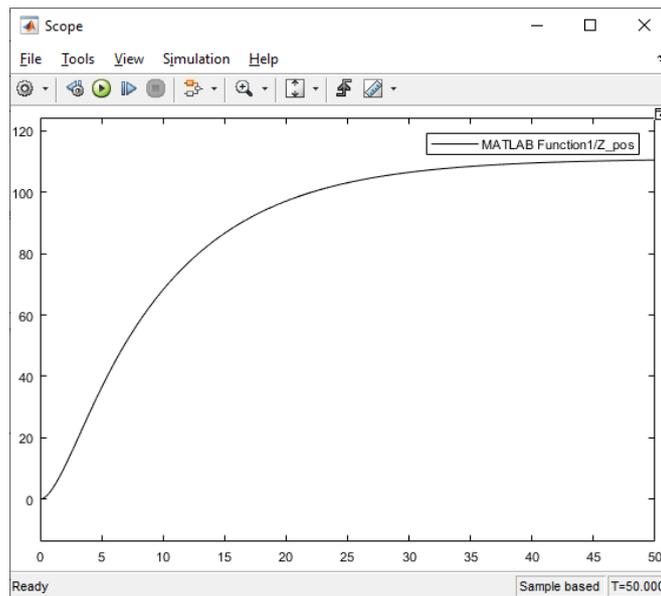
**Figura 3.10 VANT plegado**

Material		
Density		Requested Accuracy
1.278 g/cm <sup>3</sup>	Low	Clipboard
General Properties		
<input type="checkbox"/> Include Cosmetic Welds	<input type="checkbox"/> Include QTY Overrides	
Center of Gravity		
Mass	42.050 kg (Relative)	X -77.365 mm (Relative)
Area	4203858.306 mm <sup>2</sup>	Y 101.941 mm (Relative)
Volume	32904756.947 mm <sup>3</sup>	Z -131.361 mm (Relative)
Inertial Properties		
<b>Principal</b>	Global	Center of Gravity
Principal Moments		
I1	I2	I3
3337317.709 kg	3414324.498 kg	5151249.927 kg
Rotation to Principal		
Rx	Ry	Rz
0.03 deg (Relative)	0.08 deg (Relative)	-0.75 deg (Relative)

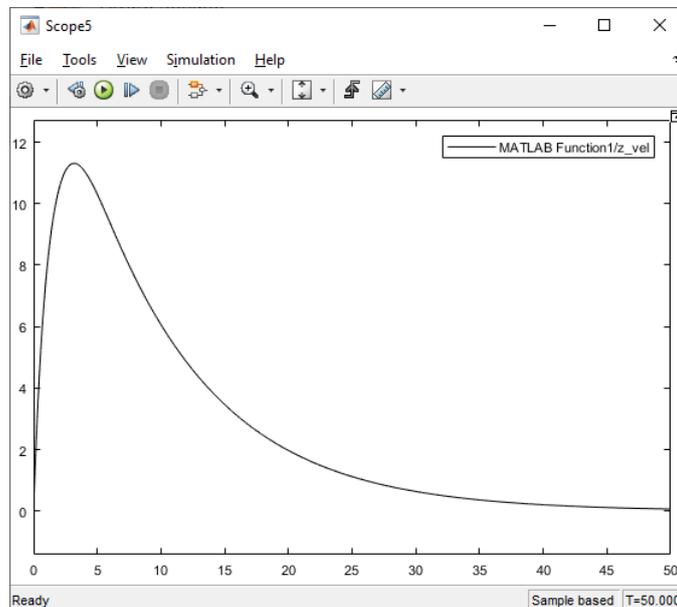
**Figura 3.11 Características inerciales del dron**

### 3.3 Sistema de control

En la Figura 3.12 se muestra la respuesta del sistema hasta alcanzar la altura de trabajo, esto lo hace en aproximadamente 35 segundos. En la Figura 3.13 se muestra la curva de velocidad del sistema para alcanzar la altura de trabajo. En el apéndice B se presenta el diagrama de bloques generado en Matlab 2017a.



**Figura 3.12 Respuesta del sistema para Z en ascenso**



**Figura 3.13 Velocidad del sistema en ascenso**

### 3.4 Controladores de vuelo

Es el dispositivo encargado de enviar las señales de control a los actuadores. Es donde se configura el sistema de control para las operaciones del VANT.

Se selecciono el controlador Marca DJI modelo NAZA M-V2 mostrado en la Figura 3.14, ya que permite integrar un motor extra para la bomba del sistema de fumigación. Las características del controlador de vuelo se presentan en la Tabla 3.6 [34].



Figura 3.14 Controlador NAZA M-V2 [34]

**Tabla 3.6 Características controlador de vuelo NAZA M-V2**

Compatible con multirrotores (6)	Si
Frecuencia de salida para ESC	400 Hz
Frecuencia de transmisión	Mínimo 2.4 GHz con 4 canales
Consumo de potencia	Max: 1.5 W (0.3A@5V) Normal: 0.6 W (0.12A@5V)
Temperatura de operación	-1°C a 50°C
Protección de bajo voltaje	Si
Protección contra fallas salida potencia	Si
Velocidad de ascenso/descenso	4.5 m/s, 6m/s
Peso	95 g (incluye GPS, LED, PMU)

Este modelo además del MC (*Main Controller*), cuenta con el PMU (*Power Management Unit*) que es el encargado de la distribución de la energía al resto de componentes, se presenta en la Figura 3.15.



**Figura 3.15 PMU NAZA M-V2 [34]**

También se integra con un módulo GPS mostrado en la Figura 3.16 y un módulo LED mostrado en la Figura 3.17. Este es útil para dar retroalimentación de los diferentes modos de operación o mientras se realiza la configuración.



**Figura 3.16 Módulo GPS [34]**



**Figura 3.17 Modulo LED independiente [34]**

Este controlador de vuelo viene con un software para la configuración. En la Figura 3.18 se muestra la interfaz gráfica del controlador de vuelo, donde se configuran las ganancias del controlador para los ángulos de orientación y la altitud. Además, permite la integración con un control remoto, este debe tener una frecuencia de trabajo igual a MC. Se seleccionó un control de la

marca RadioLink modelo T8FB, con un rango de control de hasta 2 Km, mostrado en la Figura 3.19.

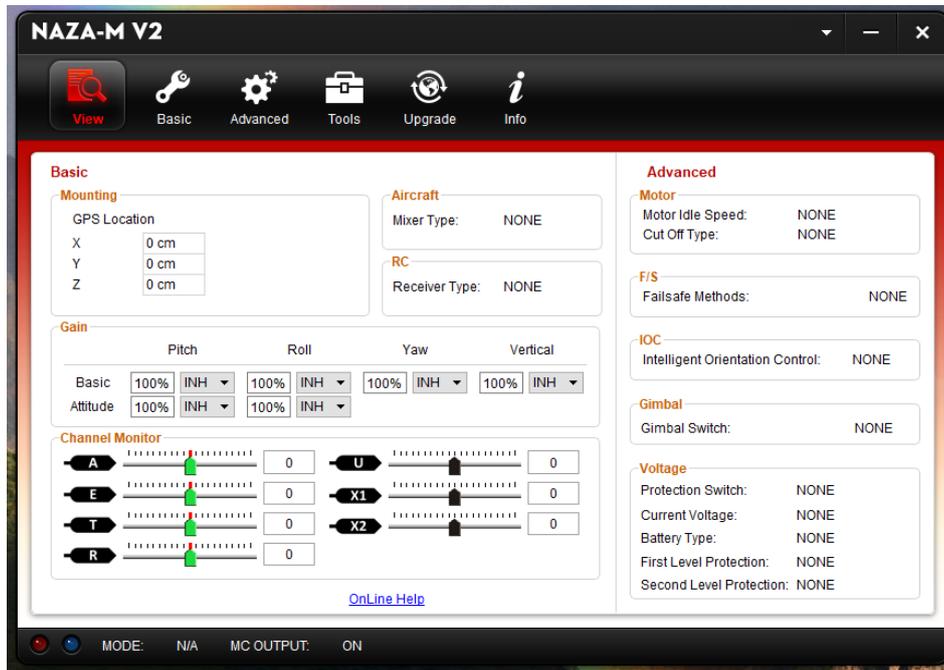


Figura 3.18 Interfaz software NAZA M V2



Figura 3.19 Control remoto RadioLink [35]

### 3.5 Motores

Se calcularon cuatro niveles de potencia para diferentes operaciones, se utiliza el mayor y adicionalmente se considera un factor de mérito ( $F_m$ ) de 0.8 para compensar los errores de la TCM y se aplica la ecuación 3.2 y un factor de servicio ( $F_s$ ) de 1.25 expresado en la ecuación 3.3, para asegurarnos que la demanda de potencia al sistema de alimentación no sobrepase su capacidad y no dañar algún componente electrónico.

$$P_{req} = \frac{P_{max}}{F_m} \quad (3.2)$$

$$P_{req} = \frac{P_{max}}{0.8} = 1075 \text{ W}$$

$$P_{motor} = F_s * P_{req} \quad (3.3)$$

$$P_{motor} = 1.25 * P_{req} = 1394 \text{ W}$$

Para seleccionar el motor se consideró la potencia  $P_{motor}$  calculada anteriormente. Los motores más utilizados en aplicaciones de VANT son motores sin escobillas, que son motores de corriente directa, que mediante circuitos electrónicos simulan ser de corriente alterna, algunas ventajas de estos motores son: requieren de poco mantenimiento, no generar temperaturas elevadas en comparación a los motores con escobillas y son menos pesados.

En la Figura 3.20 se muestran las características de los motores serie T8000 del fabricante Titan, el motor que se selecciono fue T8115 presentado en la Figura 3.21, con una potencia máxima continua de 1613.2 W, una corriente máxima continua de 34.58 A, un peso de 451 g y 100 KV (constante de revoluciones del motor, cuantos rpm ofrece al aplicar 1 V).

Model	KV	Config.	Shaft Diameter	Motor Dimension	Weight	Idle Current(10)	Max. Continuous Current(A)	Max. Continuous Power(W)	Internal Resistance
T8110	140	36N40P	Φ20mm	Φ88.6*37.9mm	350g	0.66A	38.85	1812.6	86mΩ
T8115	100	36N40P	Φ20mm	Φ88.6*42.9mm	451g	0.72A	34.58	1613.2	383mΩ
T8120	100	36N40P	Φ20mm	Φ88.6*47.9mm	556g	0.87A	49.16	2266.9	215mΩ

**Figura 3.20 Características motores Titan T8000 [36]**



**Figura 3.21 Motor Titan T8115 [36]**

El fabricante brinda además una tabla para diferentes diámetros de hélices. En la Figura 3.22 se muestra los valores para una hélice de 30", donde se muestra que con un 95% de aceleración se llega a 1459.1 W. Esta operación se realiza a una temperatura de 46 °C. Estos son valores obtenidos alimentando a los motores con baterías de 6 celdas.

Volts(V)	Prop	Throttle	Amps(A)	Watts(W)	Thrust(g)	Efficiency(g/W)	Operating Temp. (°C)
48	PJP-T-L 30X10	50%	6.87	340.4	3730.00	10.96	46°C
		55%	8.85	436.3	4460.00	10.22	
		60%	10.93	531.2	5120.00	9.64	
		65%	13.12	640.5	5930.00	9.26	
		70%	15.83	769.8	6680.00	8.68	
		75%	18.12	875.8	7320.00	8.36	
		80%	21.25	1021.7	7920.00	7.75	
		85%	24.06	1148.3	8610.00	7.50	
		90%	27.60	1309.1	9320.00	7.12	
		95%	31.04	1459.1	10050.00	6.89	
	100%	34.58	1613.2	10650.00	6.60		

**Figura 3.22 Motor T8115 valores de potencia para hélices de 30 in [36]**

Los motores requieren de un ESC (*Electronic Speed Controller*) que es el encargado de tomar la señal desde el controlador de vuelo hasta los motores, realiza las variaciones del tren de pulso para regular la velocidad de los motores para realizar los diferentes movimientos.

Se seleccionó un ESC recomendado por el fabricante para el motor T8115, es el Pulse ESC P80 mostrada en la Figura 3.23, la capacidad máxima de corriente es de 80 A.



**Figura 3.23 ESC Motor T8115 [37]**

### **3.6 Selección de elementos de alimentación**

Apéndice D.

### **3.7 Diagrama de conexiones eléctricas**

La Figura 3.24 muestra el diagrama de conexiones entre el controlador de vuelo, sensores, los ESC y los motores del hexacóptero.

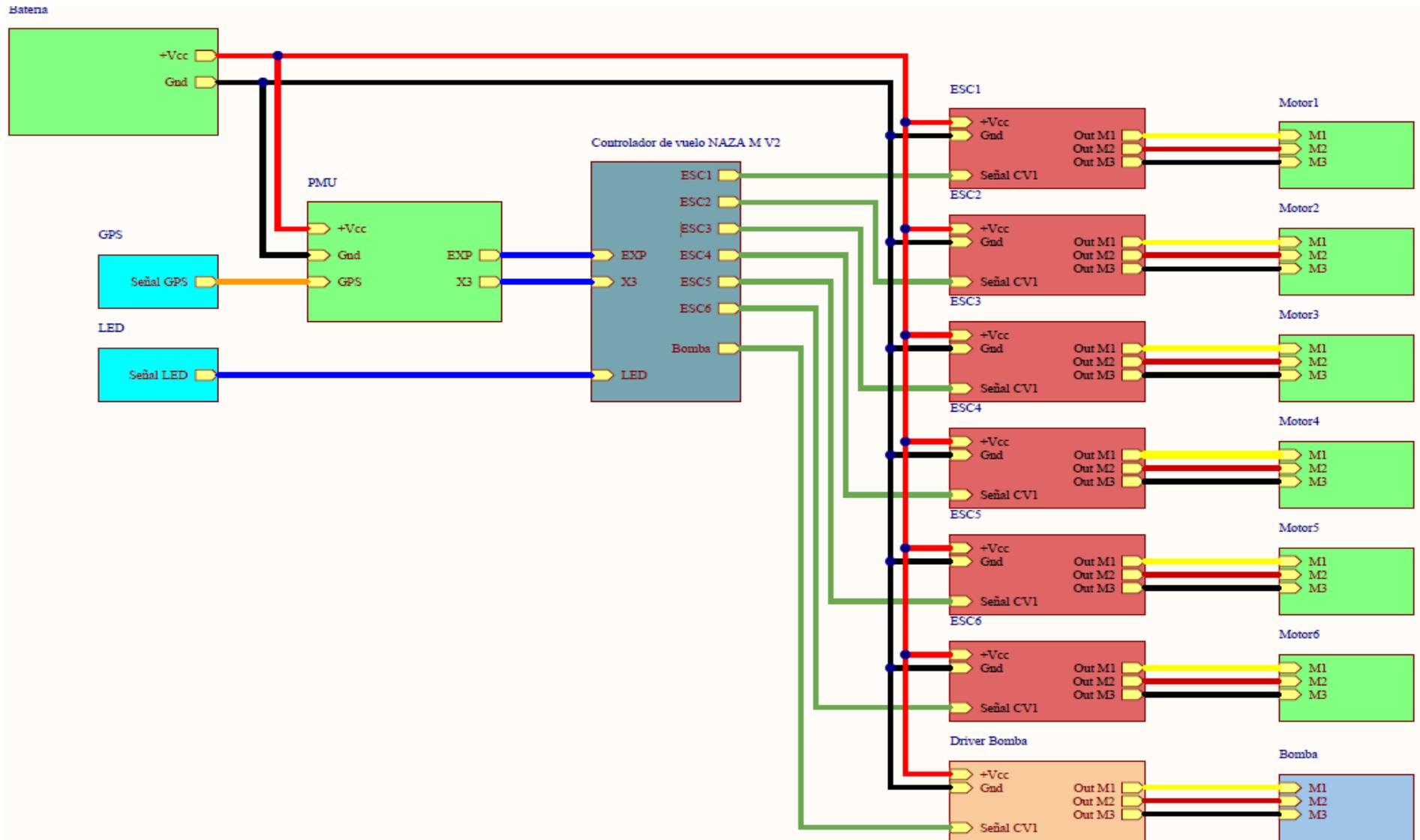


Figura 3.24 Diagrama de conexiones eléctricas

### 3.8 Análisis de costos

Como se muestra en la Tabla 3.7 el costo de construcción estimado del hexacóptero es de \$ 14 474.74. El cual se calculó asumiendo la venta de un único dron, el tiempo invertido por los dos integrantes del proyecto, el sueldo promedio de un ingeniero mecánico recién graduado en el país (\$780 [38]).

El costo de manufactura se determinó a partir de una simulación computacional en el que se cargaba el archivo 3D del elemento y el precio del material por unidad de masa. Los precios para el Aluminio considerados fueron de \$4.50 por kg [39].

**Tabla 3.7 Análisis de costos**

Elemento	Cantidad	Costo Unitario	Costo
<b>SISTEMA DE FUMIGACIÓN</b>			
Tanque	1	\$ 56.90	\$ 56.90
Aspersor	2	\$ 13.18	\$ 26.36
Manguera	1	\$ 8.55	\$ 8.55
Bomba	1	\$ 8.55	\$ 8.55
Driver Bomba	1	\$ 73.90	\$ 73.90
Conector tipo "T"	1	\$ 11.85	\$ 2.00
Abrazadera de manquera 1 in	7	\$ 2.50	\$ 17.50
Pernos	8	\$ 0.25	\$ 2.00
Total sistema de fumigación			\$ 205.61
<b>SISTEMA ESTRUCTURAL</b>			
Aluminio 7075	1	\$ 45.00	\$ 45.00
Tubos de Aluminio 6065 (32 mm)	1	\$ 10.00	\$ 10.00
Elementos de sujeción	152	\$ 0.30	\$ 45.60
Total sistema estructural			\$ 100.60
<b>SISTEMA DE VUELO</b>			
Motor (Titan T8115 100KV)	6	\$ 288.88	\$ 1 733.28
Hélices FA30.2x9.9 Prop-2PCS	3	\$ 387.90	\$ 1 163.70
Total Sistema de vuelo			2 896.98
<b>SISTEMA ELÉCTRICO</b>			
DJI Naza-M V2 Flight Controller	1	\$ 165.97	\$ 165.97
Radiolink modelo T8FB	1	\$ 39.90	\$ 39.90

Batería	4	\$ 297.00	\$ 1 188.00
ESC Motor T8115	7	\$ 98.99	\$ 692.93
Elementos de sujeción	64	\$ 0.40	\$ 25.60
Total sistema eléctrico			\$ 2 112.40
<b>OTROS</b>			
Pintura			\$ 50.00
Varios			\$ 200.00
Costo de Materiales			\$ 5 565.59
<b>MANO DE OBRA</b>			
Honorarios	2	\$ 1 872.00	\$ 3 744.00
Maquinado	50	\$ 103.50	\$ 5 175.00
Mano de obra			\$ 8 919.00
<b>TOTAL</b>			\$ 14 484.59

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- El tipo de dron seleccionado (hexacóptero) cumple los requerimientos de diseño, así como los materiales empleados para la estructura (Aluminio 7075 y Aluminio 6005) cumplen con los criterios de diseño.
- Los componentes validados por simulación cumplen con el factor de seguridad asignado, siendo 2.39 para el brazo (tubo) y 2.40 para la base.
- El peso, sin carga, del dron es de 26 kg y su capacidad máxima de carga es 16 kg (capacidad 16 L) dando un total de 43 kg. Por lo que su peso es similar al de modelos disponibles en el mercado (37.5 kg, capacidad 16 L).
- Las dimensiones obtenidas son similares a equipos afines. Así, para el dron plegado se tiene: 75 de alto, 66 cm de ancho y 66 cm de largo y desplegado una distancia de 1.58m sin considerar la longitud de las hélices. Representa una reducción en volumen del 39%, y reducción del 12% en los brazos.
- El sistema de fumigación propuesto trabaja con los siguientes valores nominales: a 6 m/s y 0.45 L/min. Lo que se traduce en un beneficio directo al productor de banano y al medio ambiente, ya que permitirá ahorrar pesticida y tiempo en el proceso de fumigación.
- Teóricamente se fumigaría una ha en 9.06 min, valor por debajo de la media de 13.5 min por ha, ver Tabla 1.1, representando una reducción del 33% del tiempo requerido para fumigar una hectárea.
- Se podrá emplear hasta 8.15 L/ha versus los 20 L/ha que en promedio emplea un dron (ver Tabla 1.1), un 60% menos pesticida empleado.

- Se podrá fumigar 4 ha/carga (al emplear la carga en las 4 baterías) pero para esto se requerirá rellenar el tanque (es decir 2 tanques/carga).
- La autonomía del VANT obtenida es de 36.5 min, valor que se encuentra por encima de la media.
- El rango de funcionamiento del dron es ideal para pequeños productos ya que su rango de funcionamiento es a lo largo de 20 ha (si se considera que la distribución del terreno es la de cuadrados de 100 m de lado, dispuestos uno a continuación de otro) o 2km de distancia del operador.
- De producirse el dron a gran escala significaría un aporte en la economía ecuatoriana. Ya que los tubos de Aluminio seleccionados son de producción nacional y el resto de la estructura (Aluminio 7075) es importado por una empresa en el país.
- El costo final del dron es de \$14 500 y representa un ahorro del 28% ya que normalmente su precio oscila los \$25 000.

## **4.2 Recomendaciones**

- Para construcción del dron, considerar un cargador de batería, su precio es aproximadamente \$ 150.
- Al operar el sistema de fumigación, una vez se alcanza la altura de trabajo, accionar los aspersores manualmente desde el control remoto.
- Para un correcto funcionamiento del VANT se recomienda emplearlo en condiciones ambientales favorables (no lluvia, no temperaturas extremas o vientos fuertes).
- No exceder la carga nominal.

- Para futuros trabajo se propone implementar una interfaz gráfica adaptada a las necesidades del usuario.
- Implementar un código para operar el dron asignando punto -piloto automático-.
- Desarrollar un modelo de Inteligencia Artificial (IA) que permita identificar enfermedades en el cultivo de banano, con el objetivo de proporcionar mayores beneficios al sector.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, T. Lagkas, and I. Moscholios, "A compilation of UAV applications for precision agriculture," *Comput. Networks*, vol. 172, no. January, p. 18, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107148.
- [2] A. Guevara, "Implementación de un multicóptero con capacidad de carga útil de 1,3 Kg," UDLA, 2018.
- [3] Ministerio de Comercio Exterior del Ecuador, "Informe Sector Bananero Ecuatoriano," *Minist. Comer. Exter.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2017, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [4] S. L. Pino Peralta, H. R. Aguilar, A. G. E. Apolo Loayza, and L. A. Sisalema Morejón, "Aporte del sector agropecuario a la economía del Ecuador. Análisis crítico de su evolución en el período de dolarización. Años 2000 – 2016," *Espacios*, vol. 39, no. 32, 2018, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/338013825\\_Contribution\\_of\\_the\\_agricultural\\_sector\\_to\\_the\\_economy\\_of\\_Ecuador\\_Critical\\_analysis\\_of\\_its\\_evolution\\_in\\_the\\_period\\_of\\_dollarization\\_Years\\_2000\\_-2016](https://www.researchgate.net/publication/338013825_Contribution_of_the_agricultural_sector_to_the_economy_of_Ecuador_Critical_analysis_of_its_evolution_in_the_period_of_dollarization_Years_2000_-2016).
- [5] J. Ordóñez, Á. Meléndez, M. de la P. Vela, V. Brito, and F. Saltos, "A pesar de la caída, el banano aún vive un buen momento," *Revista Gestión*, 2019.
- [6] G. Balarezo, "La producción bananera y su incidencia en la economía ecuatoriana período 2010-2016 y su segmentación en el mercado internacional," Universidad de Guayaquil, 2018.
- [7] J. Navia, "Optimización del proceso de fumigación agrícola mediante la utilización de los drones," UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO, 2019.
- [8] C. B. Barrea and J. V. Delgado, "SERVICIO DE FUMIGACIÓN CON DRONES PARA PLANTACIONES BANANERAS EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS," ESPOL, 2018.
- [9] G. Quirola, "Mitigación del Impacto Ambiental en el sector bananero con la implementación de drones para la aeroatomización," Universidad Técnica de Machal, 2017.
- [10] R. Salazar, C. Rodríguez, M. Bernal, and N. Gómez, "Coronavirus otro reto que deben afrontar los BANANEROS en el 2020," *Revista El Productor*, 2020.

- [11] R. Salazar, C. Rodríguez, M. Bernal, and N. Gómez, "Retos del sector BANANERO para el 2019," *Revista El Productor*, 2019.
- [12] "Estos son los productos y sectores que más exportan en Ecuador," *Diario El Universo*, 2019.
- [13] CFN, "Banano Y Plátanos," *Subgerencia Análisis e Inf.*, pp. 1–21, 2017.
- [14] A. Barrientos, J. Colorado, and J. del Cerro, "Aerial Remote Sensing in Agriculture: A Practical Approach to Area Coverage and Path Planning for Fleets of Mini Aerial Robots," Madrid, 2011. doi: 10.1002/rob.
- [15] MAGAP, "Guía fitosanitaria de campo cultivo de Banano."
- [16] E. Espinoza-Freire and N. Tinoco-Cuenca, "LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL RESULTANTE DE LA FUMIGACIÓN AÉREA CON PLAGUICIDAS A BANANERAS DE LA PROVINCIA EL ORO, ECUADOR." Accessed: Jun. 25, 2020. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181349354008>.
- [17] H. Peter, M. Kundi, H. Ludwig, H. Moshammer, and P. Wallner, "Estudio sobre plaguicidas y el banano," *Austrian Dr. a Heal. Environ.*, pp. 1–14, 2016, [Online]. Available: <http://www.biodiversidadla.org/content/download/139472/1073304/version/1/file/Estudio+sobre+plaguicidas+y+el+banano.+Parte+1.pdf>.
- [18] M. Chávez, "Mejoramiento de la productividad mediante la implementación de drones en el cultivo de flores de verano y rosas en el Grupo Esmeralda Ecuador," Pontificia Universidad Católica Del Ecuador, 2018.
- [19] A. Rodríguez, "Habilitación práctica del DJI Agras: drone agrario," *Iberfdrone*. <https://iberfdrone.es/habilitacion-dji-agras/>.
- [20] "Drone & GIS," 2014. <https://www.dronegis.com.ec/> (accessed Jul. 02, 2020).
- [21] G. Paguay, "En Ecuador también se producen drones," *Revista Líderes - El Comercio*, 2016.
- [22] D. Mayanquer, "SISTEMA AUTÓNOMO DE PULVERIZACIÓN PARA FUMIGACIÓN DE PLANTACIONES DE FRUTILLA ASISTIDO POR UN DRONE," UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, 2019.
- [23] J. E. Orna Chávez and P. Dávila, "Diseño, construcción y control de un hexacóptero de monitoreo," ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2015.
- [24] S. Wen, Q. Zhang, J. Deng, Y. Lan, X. Yin, and J. Shan, "Design and experiment of a variable spray system for unmanned aerial vehicles based on PID and PWM

- control,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, 2018, doi: 10.3390/app8122482.
- [25] P. W. Saavedra Alberca, “DESARROLLO DE TECNOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE DURALUMINIO EN BASE A LA NORMA ASTM – B211 CON APLICACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS DE MAQUINARIA,” ESPE, 2017.
- [26] D.-K. Le and T.-K. Nam, “A study on the modeling of a hexacopter,” *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, vol. 39, no. 10, pp. 1023–1030, 2015, doi: 10.5916/jkosme.2015.39.10.1023.
- [27] M. Moussid, A. Sayouti, and H. Medromi, “Dynamic Modeling and Control of a HexaRotor using Linear and Nonlinear Methods,” *Int. J. Appl. Inf. Syst.*, vol. 9, no. 5, pp. 9–17, 2015, doi: 10.5120/ijais2015451411.
- [28] Infoagro, “El cultivo del plátano (banano).” [https://www.infoagro.com/documentos/el\\_cultivo\\_del\\_platano\\_\\_banano\\_.asp](https://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_del_platano__banano_.asp) (accessed Jul. 28, 2020).
- [29] “FA30.2×9.9 Prop-2PCS/PAIR\_Folding\_Carbon Fiber\_Propellers\_Multirotor\_T-MOTOR Store-Official Store for T-motor drone motor,ESC,Propeller.” <https://store-en.tmotor.com/goods.php?id=401> (accessed Sep. 19, 2020).
- [30] A. Valenzuela Romero, “TCM - Vuelo Axial Introducción,” 2009. [Online]. Available: <http://www.aero.us.es/heli/downloads/0809/tcmVueloDescendente.pdf>.
- [31] “16L agriculture drone spraying tank.” <http://www.dronefromchina.com/product/16L-agriculture-drone-spraying-tank.html> (accessed Jul. 29, 2020).
- [32] “Agrizon: Atomizador/Pulverizador, Bombas de fumigación - Bomba Bellota FCI-20 20 lt.” <https://www.e-agrizon.com/producto/bomba-bellota-fci-20-20-lt/> (accessed Jul. 08, 2020).
- [33] “Wholesale Price Agras T16 Water Pump Water Separator Tee For Agras T16 Agriculture Spray Drone.” [https://www.alibaba.com/product-detail/Wholesale-Price-Agras-T16-Water-pump\\_1600091411730.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.3906cf56DCx9Yw](https://www.alibaba.com/product-detail/Wholesale-Price-Agras-T16-Water-pump_1600091411730.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.3906cf56DCx9Yw) (accessed Sep. 19, 2020).
- [34] Dji, “DJI NAZA M V2.” <https://www.dji.com/naza-m-v2/spec> (accessed Aug. 26, 2020).
- [35] “Radiolink T8FB 8CH Transmisor Radio Control Remoto con Receptor R8EF para

- RC Avión Helicóptero Drone Mano Izquierda Kaemma (Color: Negro): Amazon.es: Electrónica.” <https://www.amazon.es/Radiolink-Transmisor-Helicóptero-Izquierda-Kaemma/dp/B07WJWFKK1> (accessed Sep. 19, 2020).
- [36] “XOAR Titan T8115 100KV Brushless Electric Motor Heavy Lifting Series – Xoar Propellers.” <https://shop.xoarintl.com/collections/brushless-electric-motors/products/titan-t8115-100-kv-brushless-electric-motor> (accessed Sep. 19, 2020).
- [37] “Pulse ESC P80 – Xoar Propellers.” <https://shop.xoarintl.com/collections/esc/products/pulse-esc-p80> (accessed Sep. 19, 2020).
- [38] “¿Cuánto cobro...? Ingeniero mecánico.” <http://ecuador.cuancobro.com/?q=ingeniero+mecanico>. (accessed Sep. 18, 2020).
- [39] Cedal, “Perfileria de Aluminio: Tubos de Aluminio,” pp. 0–1, 2014.
- [40] “ISSN 2234-7925 (Print) | Han-guk marin enjinieoring hakoeji | The ISSN Portal.” <https://portal.issn.org/resource/ISSN/2234-7925#> (accessed Sep. 19, 2020).
- [41] A. Alaimo, V. Artale, C. Milazzo, A. Ricciardello, and L. Trefiletti, “Mathematical modeling and control of a hexacopter,” in *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2013 - Conference Proceedings*, 2013, pp. 1043–1050, doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564793.
- [42] “22000mah De Plantas Agrícolas Protección Uav Drone De La Batería Lipo.” <https://spanish.alibaba.com/product-detail/22000mah-agricultural-plant-protection-uav-drone-lipo-battery-60782288194.html> (accessed Sep. 19, 2020).

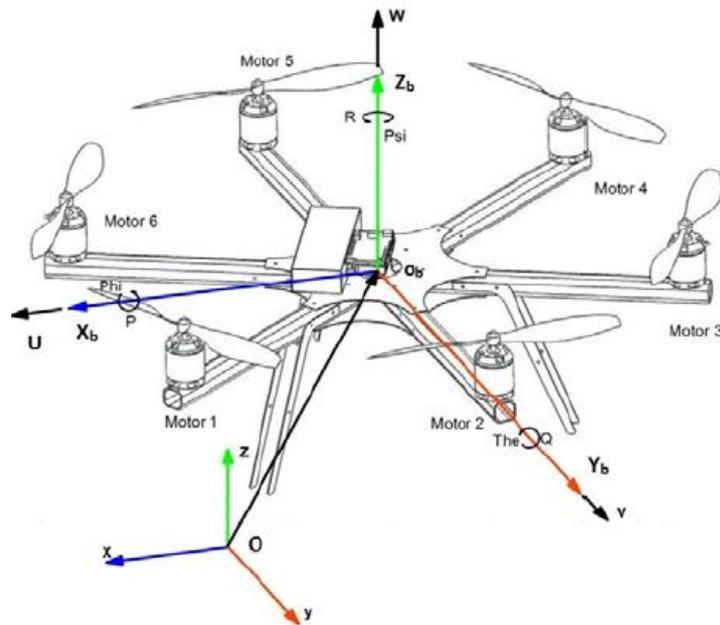
# APÉNDICES

## APÉNDICE A

### Sistemas de referencias y representación

En la

Figura A.1 se presenta el diagrama del VANT en el que se nota los dos sistemas de referencia a utilizar, el sistema inercial en Tierra ( $S_i$ ) y el sistema móvil en el VANT ( $S_b$ ).



**Figura A.1** Sistemas de referencia  $S_i$  y  $S_b$  [40]

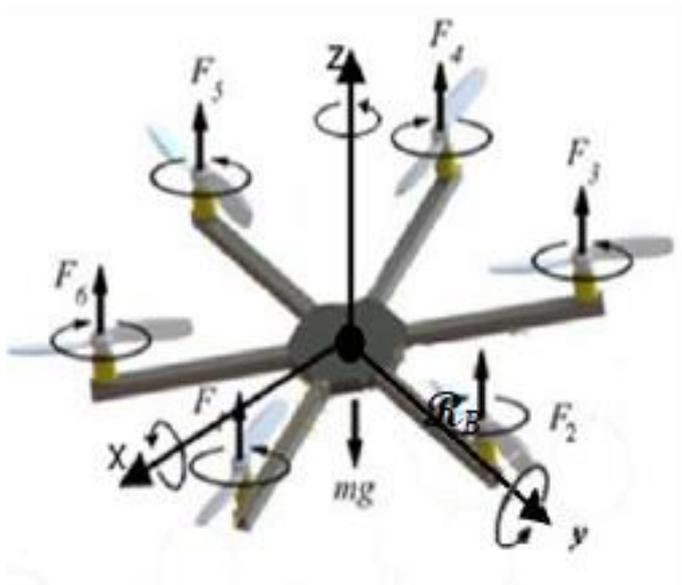
Estos sistemas de referencia se relacionan mediante la matriz de rotación  $R$ , y se obtiene la relación (A.1) presentada a continuación

$$S_b = RS_i = \begin{bmatrix} c\phi c\psi & c\psi s\theta s\phi - c\phi s\psi & c\phi c\psi s\theta + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\theta s\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} S_i \quad (\text{A.1})$$

Si se define un vector unitario  $u = (u_1, u_2, u_3)$ , y un ángulo de rotación  $\alpha$ , entonces podemos definir un cuaternio como  $q_u = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ , donde:  $q_0 = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ ,  $q_1 = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)u_1$ ,  $q_2 = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)u_2$ ,  $q_3 = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)u_3$ .

En la

Figura A.2 se presenta el diagrama de cuerpo libre con el sistema de referencia ubicado en el VANT, las fuerzas de sustentación, los torques y cada una de las velocidades de los motores en los extremos de cada brazo del hexacoptero.



**Figura A.2 Diagrama de cuerpo libre**

En el hexacóptero definimos los vectores  $\xi = [x \ y \ z]^T$ ,  $\eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ , para la posición y los ángulos de rotación. En el marco de referencia en el VANT tenemos la velocidad lineal y la velocidad angular definidas como  $V_B = [V_{x,B} \ V_{y,B} \ V_{z,B}]^T$  y  $v = [p \ q \ r]$ . La transformación de velocidades de traslación de un marco de referencia en el VANT a un marco de referencia inercial en tierra puede expresarse como  $\dot{\xi} = Q\dot{\xi}_B$ , donde  $\dot{\xi}$  es el vector de velocidades respecto a tierra,  $\dot{\xi}_B$  es el vector de velocidades respecto al sistema de referencia en el VANT y Q se presenta en la ecuación (A.2).

$$Q = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 + q_2q_3) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

Q es ortogonal, lo que quiere decir que  $Q^{-1} = Q^T$ . Por otro lado, para la transformación de velocidades angulares se puede definir como  $\dot{q} = Sv$ , donde S está definida en (A.3)

$$S = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

También es posible relacionar los cuaternios con sus derivadas mediante la siguiente matriz [41].

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Para el análisis de las fuerzas que actúan sobre el hexacóptero, se consideran que los motores propulsores se encuentran equidistantes del centro de masa, cada uno en el vértice de un hexágono. También se considera al hexacóptero como un objeto rígido. El movimiento de un cuerpo rígido puede ser analizado como la composición de un movimiento de traslación y un movimiento de rotación.

Se define la matriz de momentos de inercias A.5, que indica cómo la velocidad de rotación se verá afectada por el torque generado por la distribución de la masa en todo el hexacóptero [26]. Ésta es una matriz diagonal debido a que se considera la simetría del VANT y el centro de masa en el centro del hexágono.

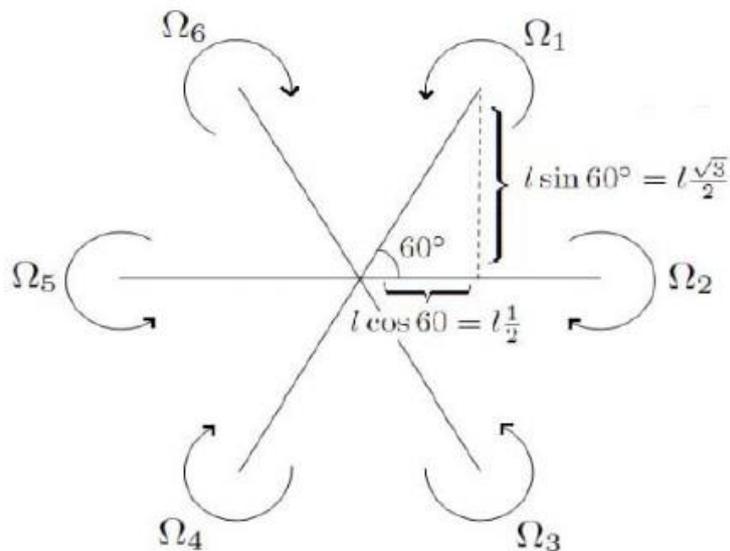
$$I_b = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Los motores generan un empuje  $T_s$  es empuje es el que hace posible el vuelo del VANT, podemos obtenerlo con la siguiente ecuación  $T_s = C_T \bar{\omega}^2$ , donde  $C_T$  es el coeficiente de empuje de un conjunto motor-hélice, y  $\bar{\omega}$  es la velocidad angular del motor.

Por lo tanto, para obtener el empuje total debido a los seis rotores utilizamos la siguiente ecuación.

$$T = C_T \sum_{i=1}^6 \overline{w}_i^2 \quad (\text{A.6})$$

Cuando ocurren variaciones en las velocidades de los motores, aparecen torques en cada extremo del hexacóptero. Estos torques permitirán las rotaciones de balanceo, cabeceo y guiñada. En la Figura A.3 se muestra la geometría del hexacóptero para obtener los torques de cada motor.



**Figura A.3 Distancias consideradas para torques [40]**

Para obtener un movimiento de balanceo, cabeceo y guiñada, las ecuaciones son las siguientes

$$\tau_\phi = l C_T \left( -w_2^2 + w_5^2 + \frac{1}{2} (-w_1^2 - w_3^2 + w_4^2 + w_6^2) \right) \quad (\text{A.7})$$

$$\tau_\theta = l C_T \frac{\sqrt{3}}{2} (-w_1^2 + w_3^2 + w_4^2 - w_6^2) \quad (\text{A.8})$$

$$\tau_{\psi} = C_T(-w_1^2 + w_2^2 - w_3^2 + w_4^2 - w_5^2 + w_6^2) \quad (\text{A.9})$$

La rotación de los motores propulsores también produce un efecto giroscópico, se puede obtener mediante la siguiente ecuación

$$\tau_{giroscopio} = \begin{bmatrix} -I_r \dot{q} w_r \\ I_r \dot{p} w_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Donde  $I_r$  es la inercia rotacional y  $w_r = -w_1 + w_2 - w_3 + w_4 - w_5 + w_6$ . Este último es la velocidad de propulsión tomando en cuenta todos los lados.

## APÉNDICE B

Diagrama del sistema de control empleado

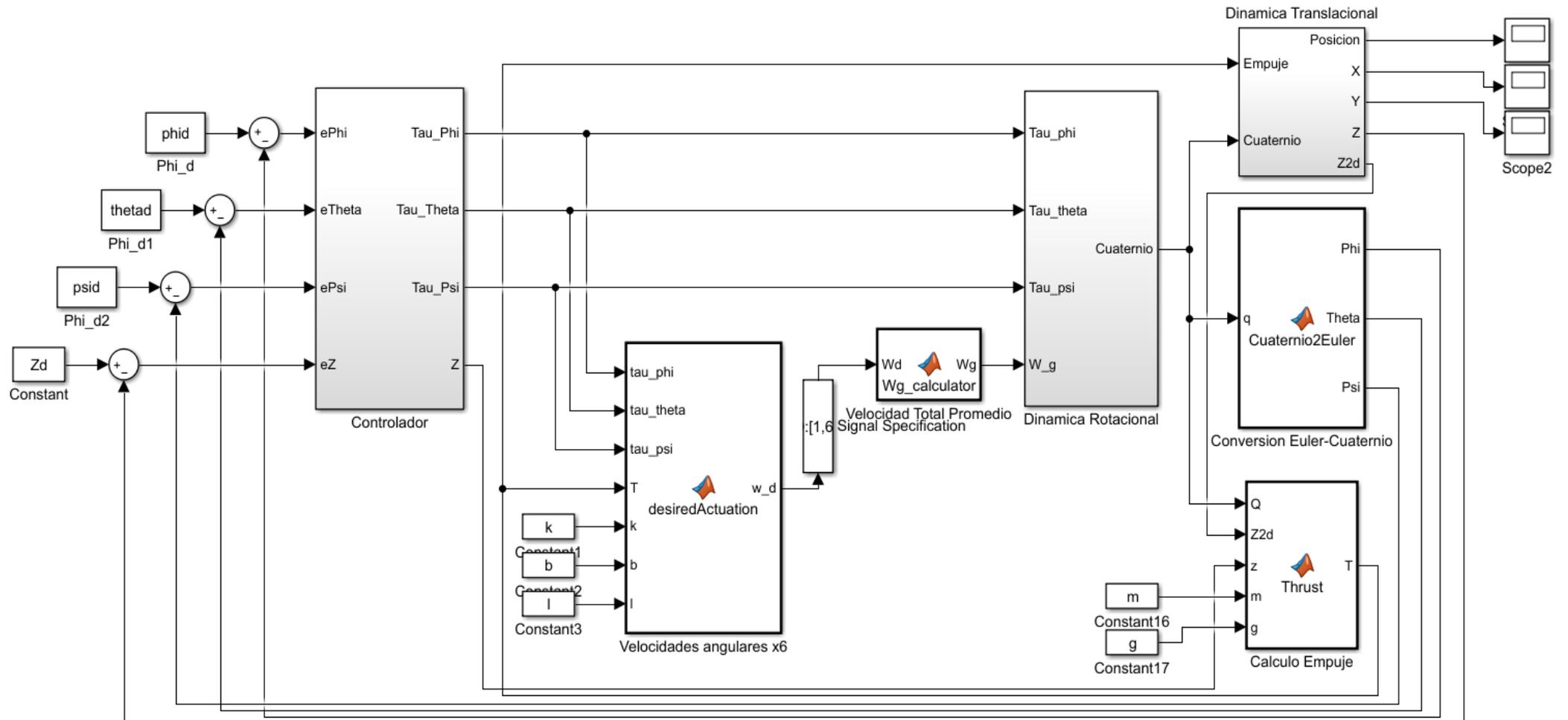


Figura B.1 Diagrama de bloques del controlador

## APÉNDICE C

### Catálogo del tubo seleccionado



PERFILERIA  
DE ALUMINIO

TUBOS  
REDONDOS



REFERENCIA	Diámetro (D)		Espesor (E) mm	Peso Kg/m
	Milímetros	Pulgadas		
1012	50.80	2	1.27	0.536
1013	76.20	3	1.27	0.810
1136	90.00	3 35/64	6.00	4.291
1148	9.52	3/8	1.14	0.081
1149	7.92	5/16	1.20	0.070
1157	17.90	45/64	1.07	0.153
1158	23.40	59/64	1.24	0.234
1167	101.60	4	1.27	1.085
1168	127.00	5	1.50	1.603
1169	152.40	6	1.65	2.12
1204	25.40	1	2.00	0.380
1254	32.00	1 17/64	2.00	0.511
1482	90.00	3 35/64	4.50	3.720
1600	101.60	4	4.50	3.247
1720	29.50	1 5/32	1.45	0.346
1721	38.35	1 33/64	1.65	0.516
1722	44.20	1 47/64	1.65	0.598
1723	55.80	2 13/64	1.65	0.761
1888	114.30	4 1/2	5.20	4.83



COMERCIALIZADORA ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A.

TUBOS REDONDOS

Figura C.1 Catálogo de perfiles de aluminio

## APÉNDICE D

### Selección de elementos de alimentación

El fabricante de los motores recomienda utilizar baterías de 6 celdas, se tienen 3 movimientos posibles, en cada uno se consume más o menos corriente. Estos movimientos son: potencia en vuelo a punto fijo 600.08 W, potencia en vuelo axial ascendente 859.80 W y potencia en vuelo avance horizontal 895.59 W. Si se emplea una batería de 6 celdas, y cada celda tiene 3.7 V se tendría un voltaje de 22.2 V. Se selecciono una batería mostrada en la Figura con 6 celdas y capacidad de carga y descarga de 22 000 mAh.



Figura D.1 Batería Li-Po seleccionada [42]

Se utiliza la ecuación D.1 para determinar la corriente que se consume en cada movimiento

$$I_{motor} = \frac{P_{motor}}{V_{motor}} \quad (D.1)$$

por lo tanto, se tienen los siguientes valores de corriente: vuelo a punto fijo  $i_{i0} = 26.8516$  A, vuelo axial ascendente  $i_i = 38.5622$  A y vuelo en avance horizontal  $i_a = 40.1707$  A. Para realizar la tarea de fumigación se considera

que un 30% del tiempo se empleará en el movimiento axial ascendente, un 40% en vuelo a punto fijo y 40% en movimiento en avance horizontal.

Se modelan estos tiempos en la ecuación D.2 para determinar la capacidad requerida

$$C_r = \eta n_r t [0.4i_{io} + 0.3i_i + 0.4i_a] \quad (D.2)$$

donde  $t$  es el tiempo de vuelo para todo el proceso,  $n_r$  es el número de motores y  $\eta$  es el coeficiente de seguridad, se utilizó un coeficiente de 1.15. Considerando un tiempo de vuelo de 0.5 horas se obtiene  $C_r$  igual a 114 629 mAh.

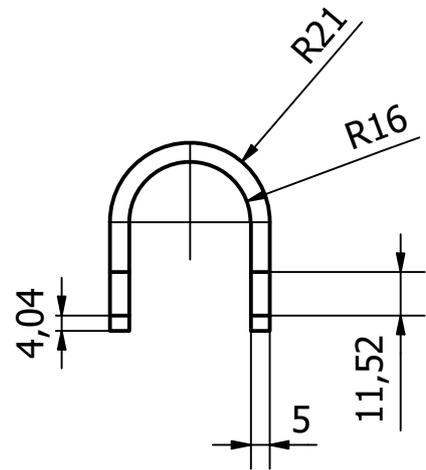
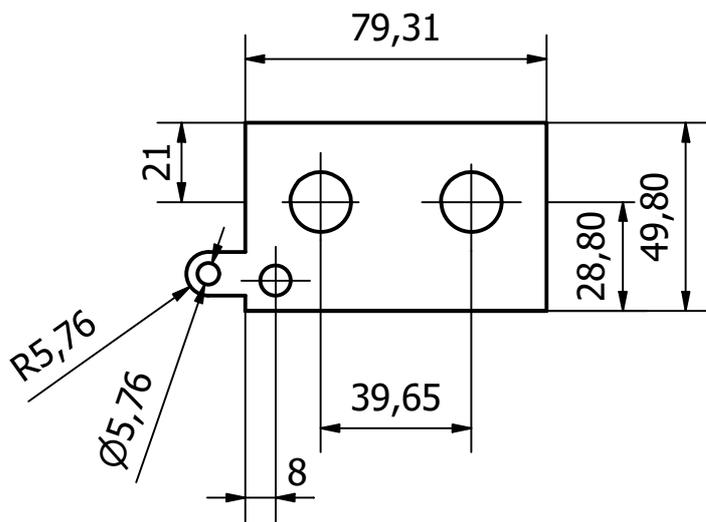
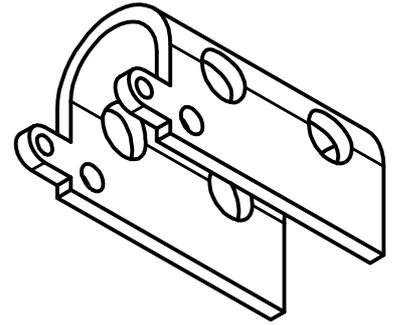
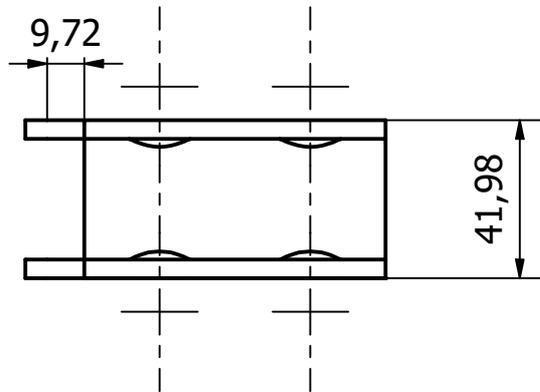
Para determinar el tiempo de vuelo se utiliza la ecuación D.3 donde  $n_b$  es el número de baterías utilizamos 4 para este cálculo y  $C_b$  es la capacidad de la batería seleccionada.

$$t_v = \frac{60n_b C_b}{C_r} \quad (D.3)$$

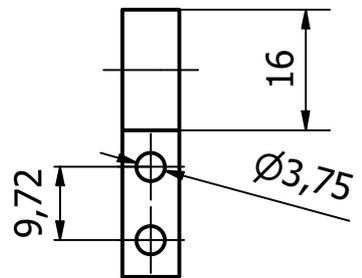
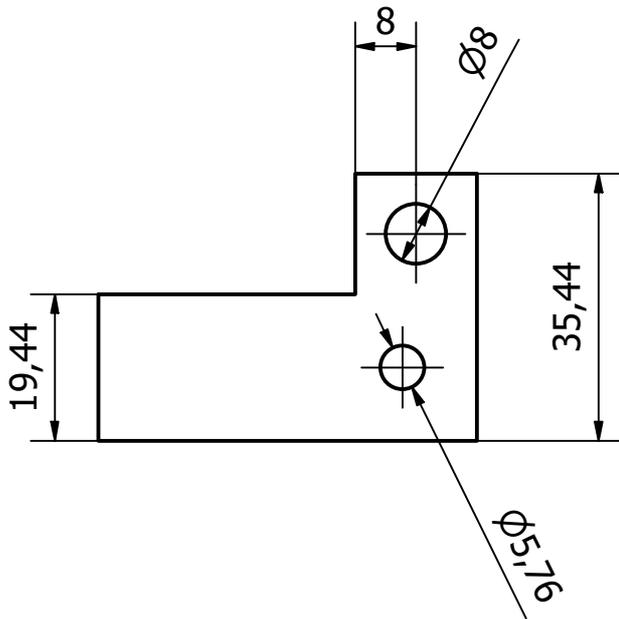
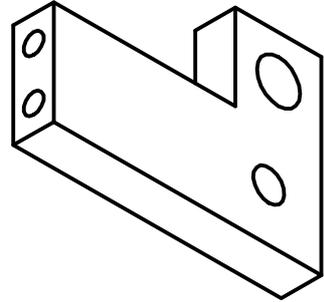
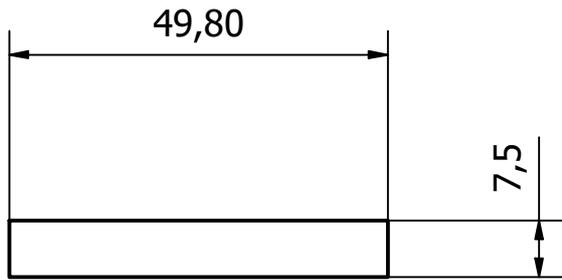
reemplazando valores se obtiene un tiempo de vuelo de 36.6 minutos.

# APÉNDICE E

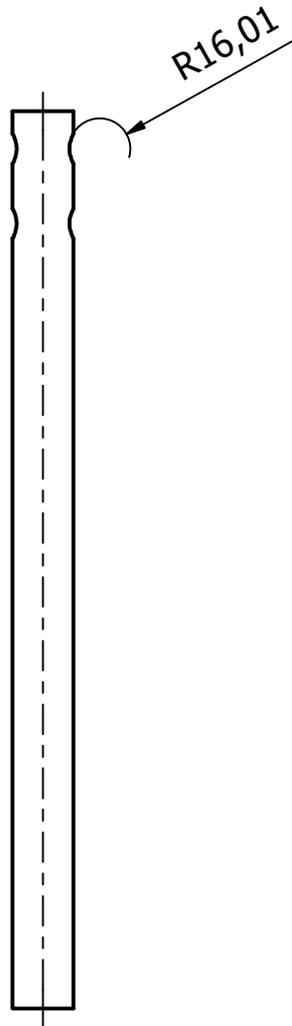
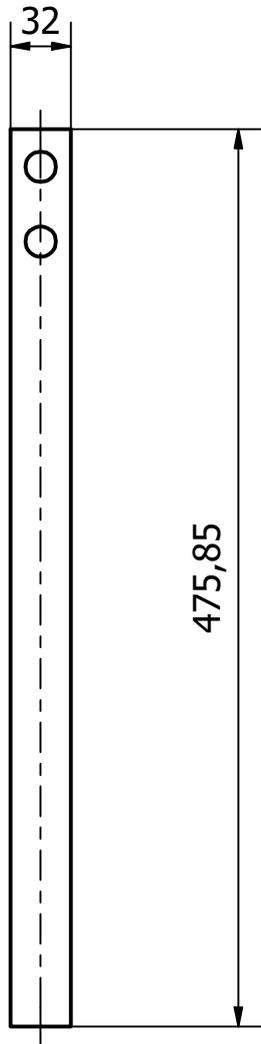
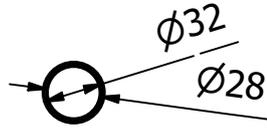
## Planos



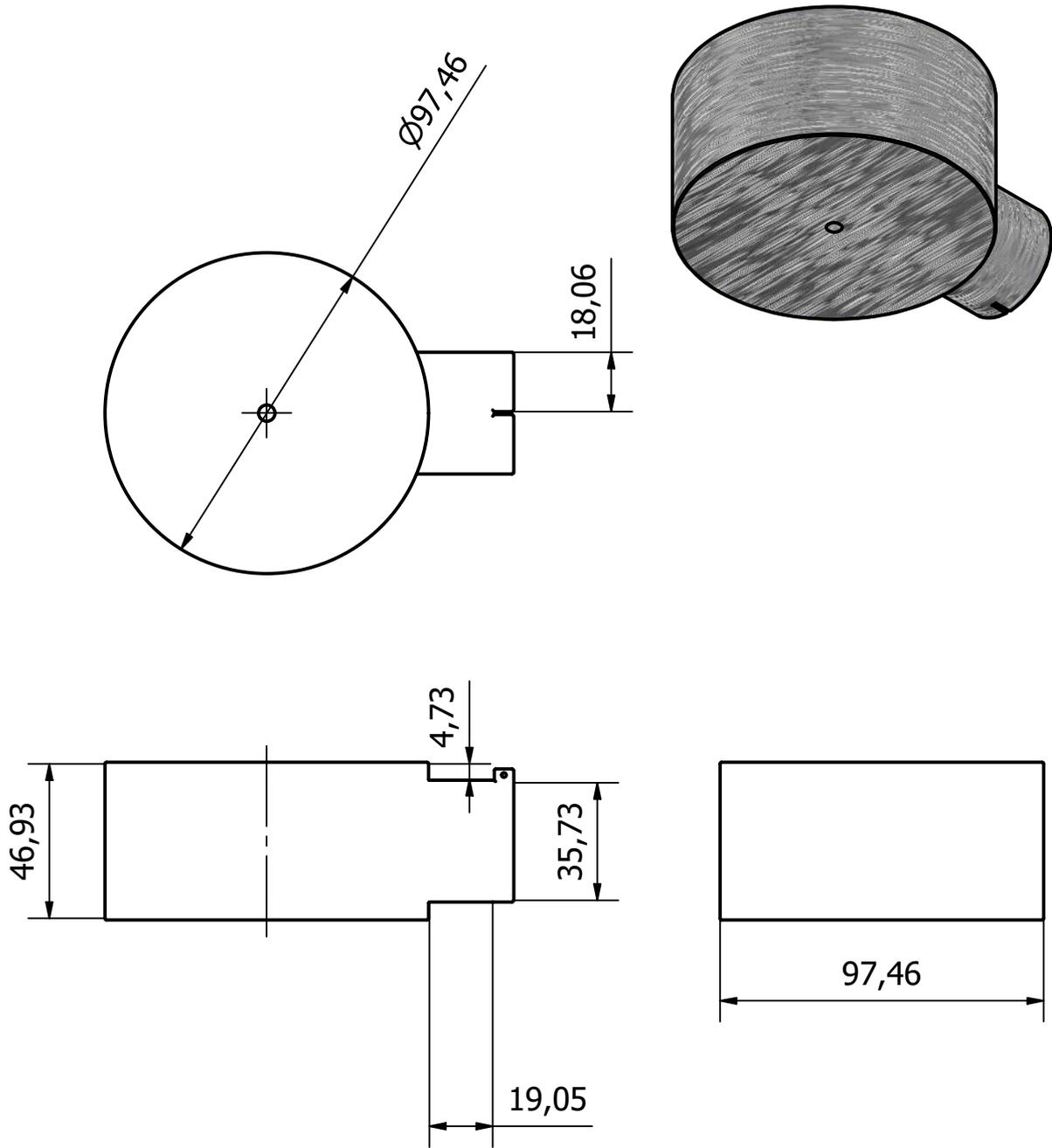
	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción	Dib.	Charly González, Moisés Bajaña	Escala 1 : 2
		Rev.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
		Aprob.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
Abrazadera	VANT001	Material	Al 7075	Fecha 18/09/2020
		Unidades	mm	



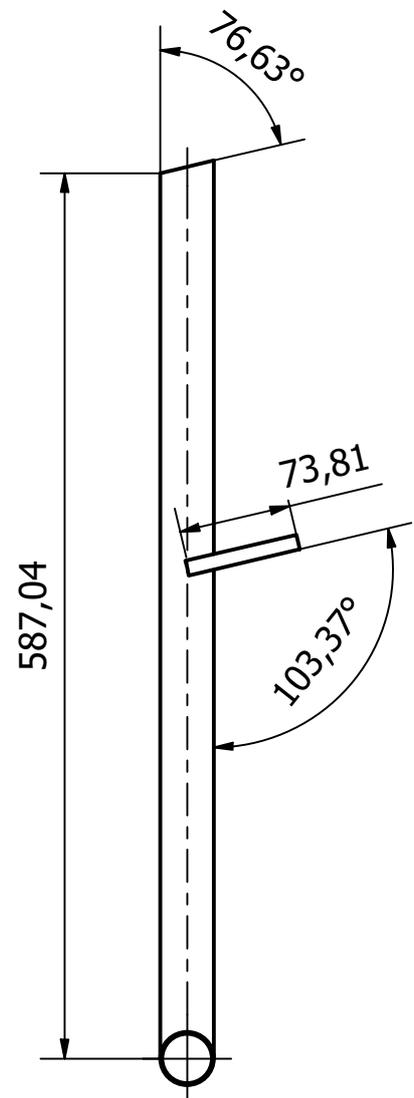
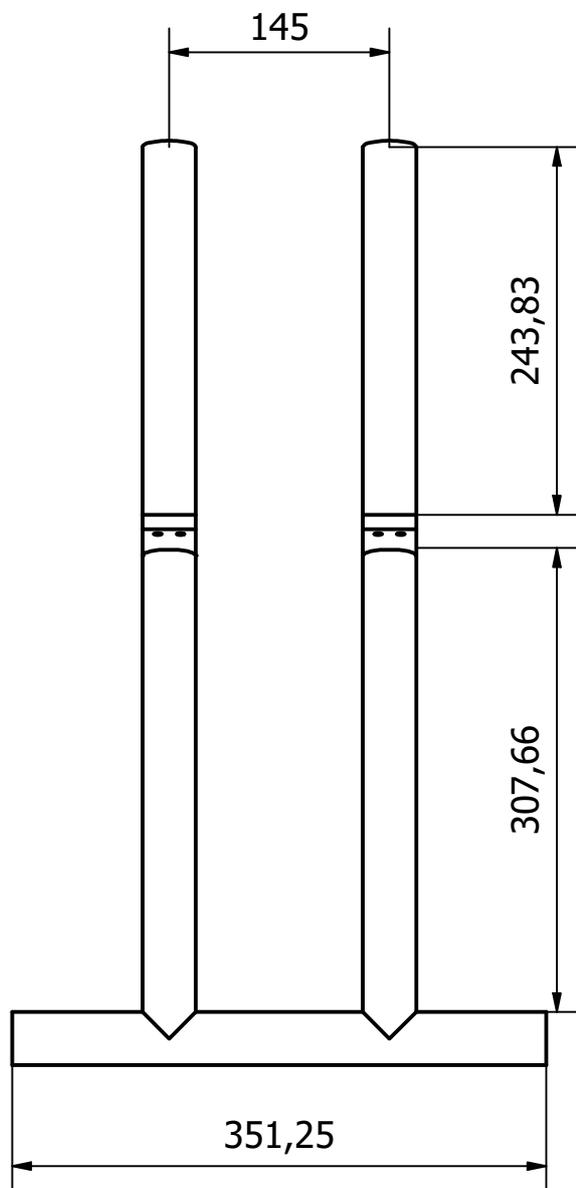
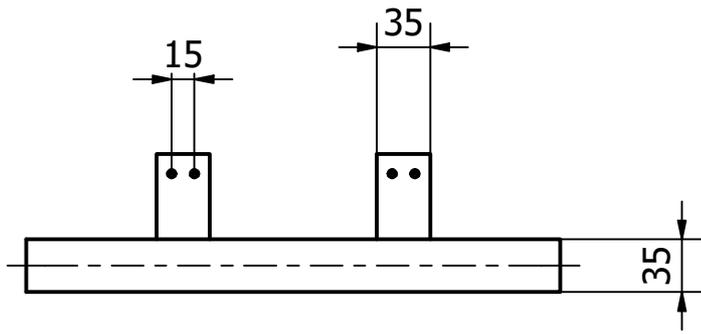
	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción	Dib.	Charly González, Moisés Bajaña	Escala 1 : 1
		Rev.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
		Aprob.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
Placa Abrazadera	VANT002	Material	Al 7075	Fecha 18/09/2020
		Unidades	mm	



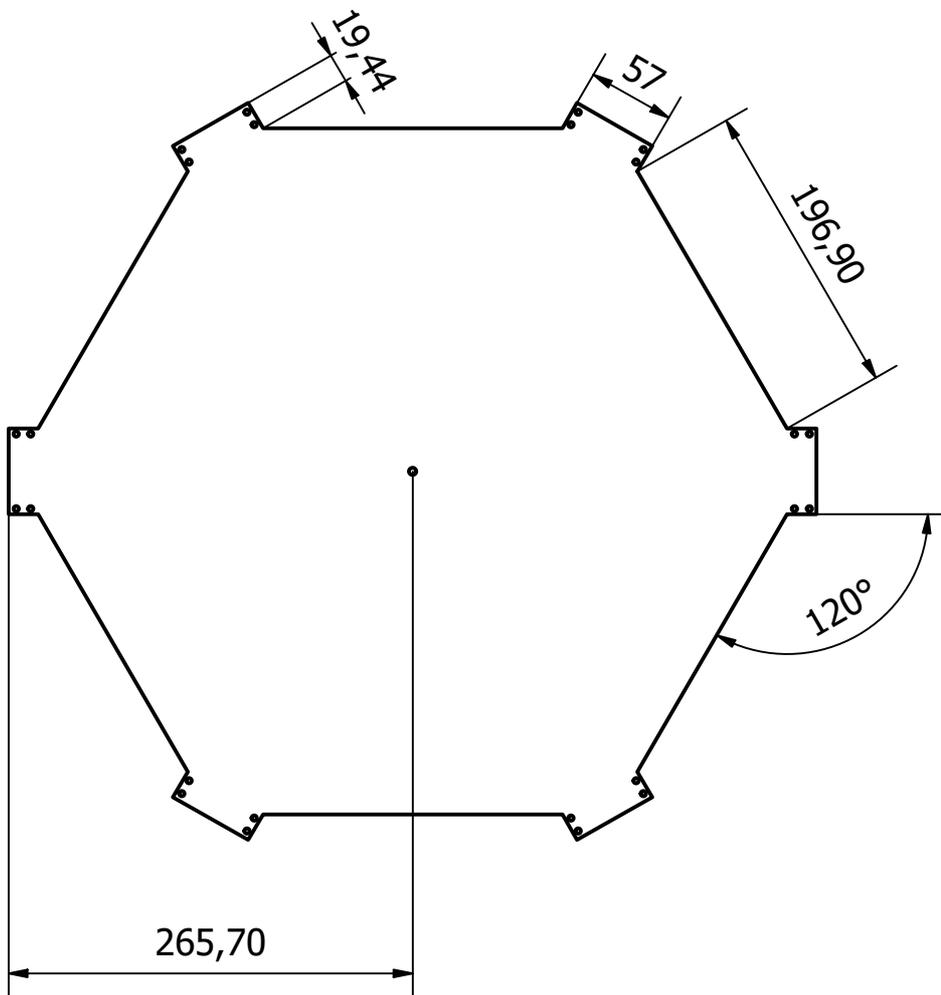
	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción	Dib.	Charly González, Moisés Bajaña	Escala  <b>1 : 4</b>
		Rev.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
		Aprob.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
Brazo - Tubo	VANT003	Material	Al 6005	Fecha
		Unidades	mm	18/09/2020



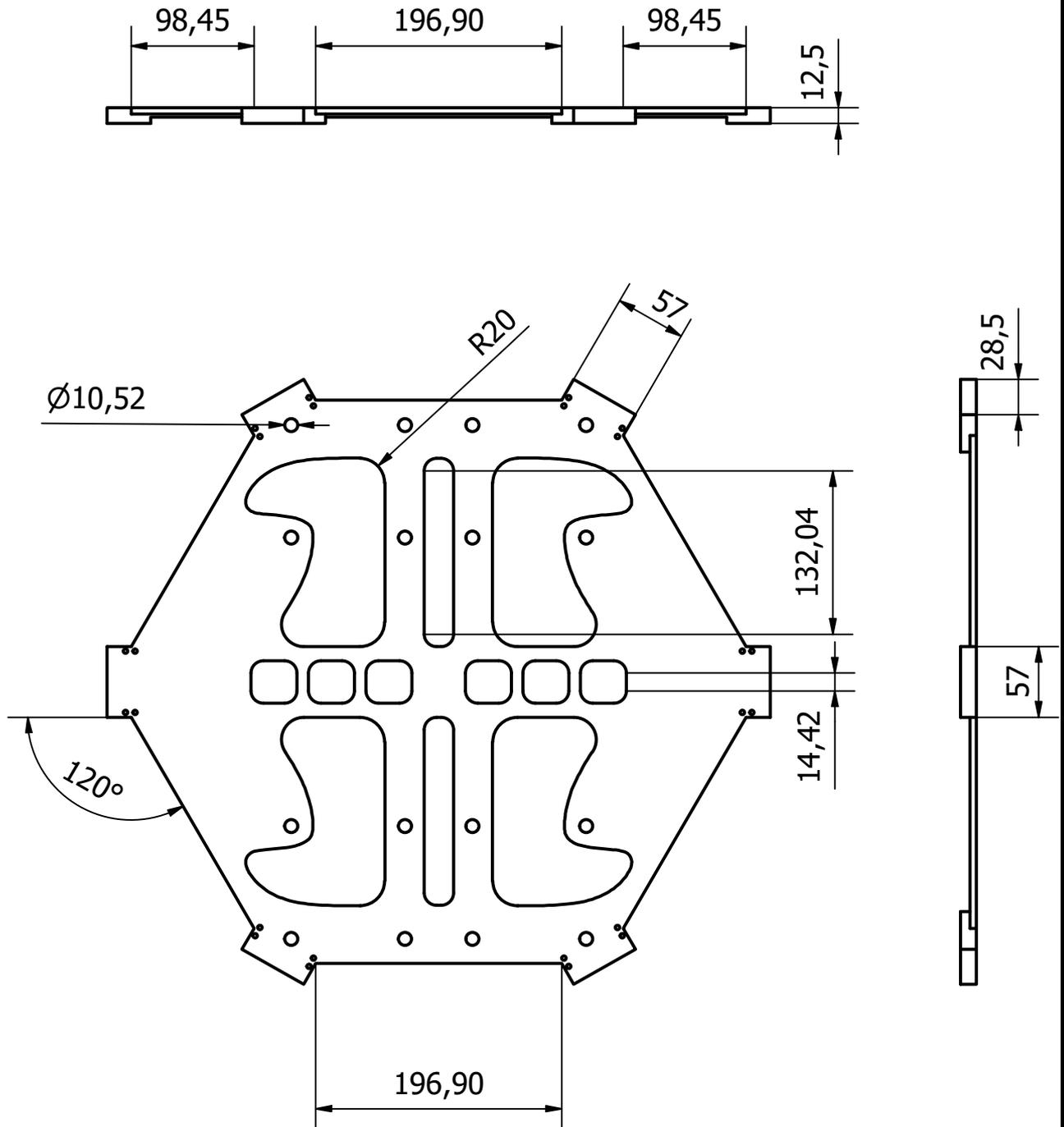
<b>espol</b>	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción	Dib.	Charly González, Moisés Bajaña	Escala  1 : 2
		Rev.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
		Aprob.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
Soporte motor		VANT004		Fecha 18/09/2020
		Material	Al 7075	
		Unidades	mm	



	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción	Dib.	Charly González, Moisés Bajaña	Escala  1 : 5
		Rev.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
		Aprob.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
Tren de aterrizaje	VANT005	Material	Al 7075	Fecha 18/09/2020
		Unidades	mm	



	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción	Dib.	Charly González, Moisés Bajaña	Escala  <b>1 : 5</b>
		Rev.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
		Aprob.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
Placa Superior	VANT006	Material	Al 7075	Fecha 18/09/2020
		Unidades	mm	



espol

Facultad de Ingeniería en  
Mecánica y Ciencias de la  
Producción

Dib.	Charly González, Moisés Bajaña
Rev.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.
Aprob.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.

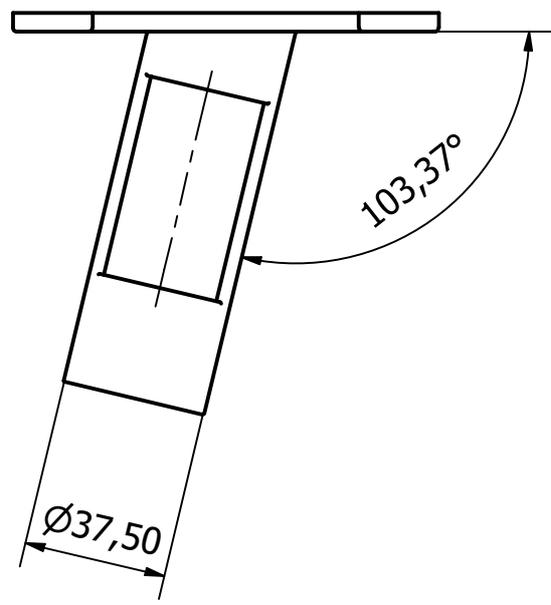
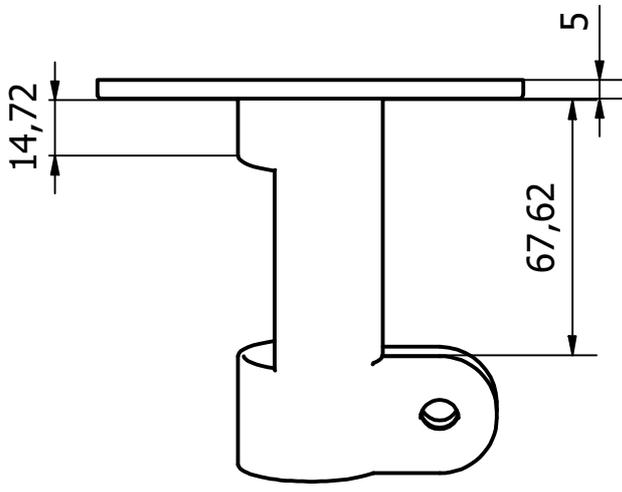
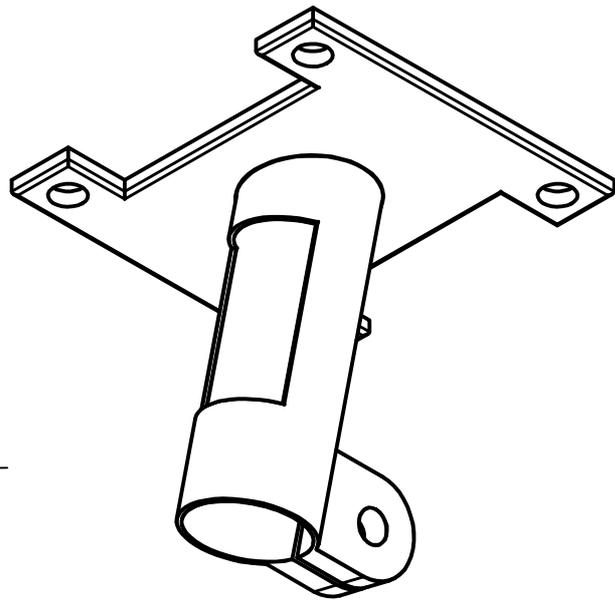
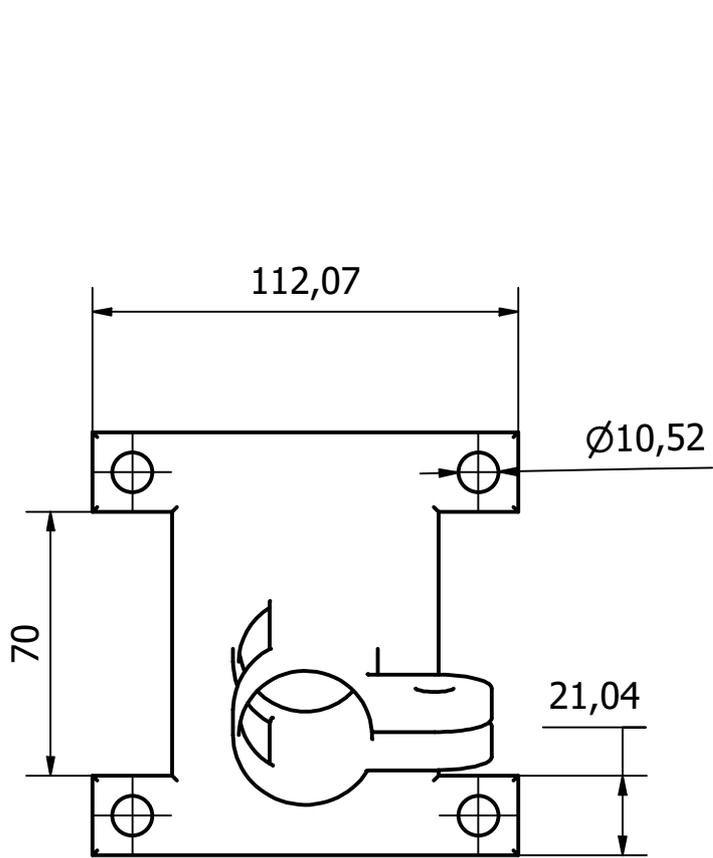
Escala  
1 : 5

Base Inferior

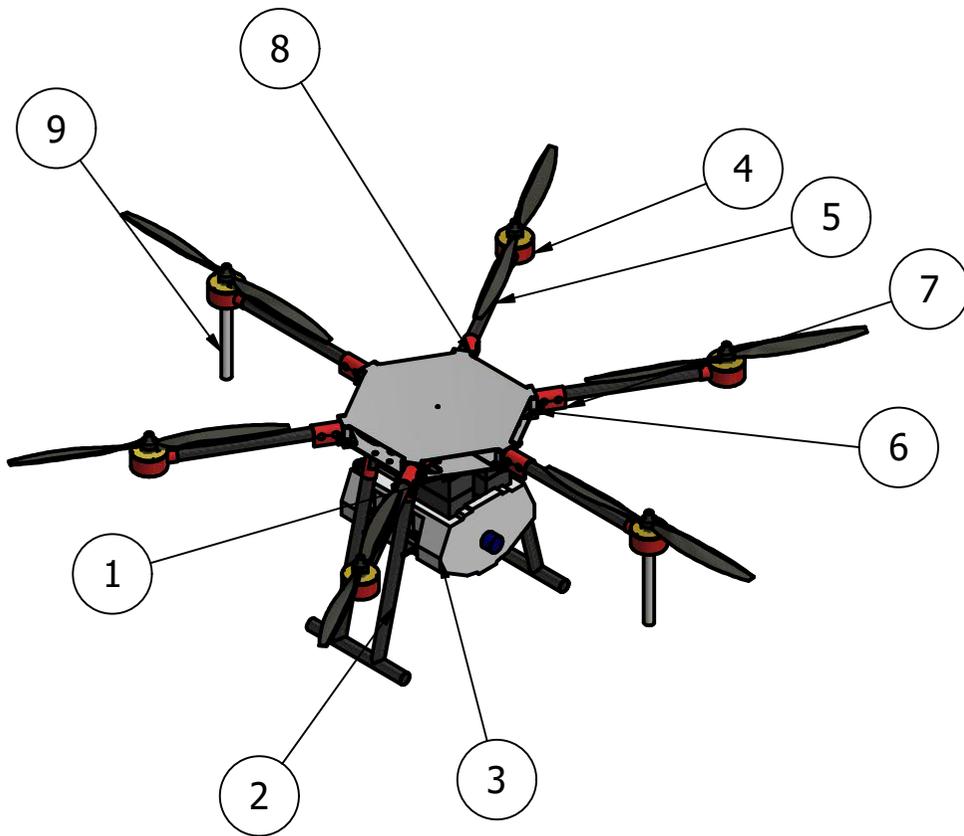
VANT007

Material	Al 7075
Unidades	mm

Fecha	18/09/2020
-------	------------



	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción	Dib.	Charly González, Moisés Bajaña	Escala 1 : 2
		Rev.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
		Aprob.	Marcelo Fajardo-Pruna, Ph.D.	
Junta base - tren de aterrizaje	VANT008	Material	Al 7075	Fecha 18/09/2020
		Unidades	mm	



### LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	TÍTULO	MASA	MATERIAL
1	1	Base Inferior	2,069 kg	Aluminum 7075
2	2	Tren de aterrizaje	0,595 kg	Aluminum 7075
3	1	Tanque	16,618 kg	Plástico
4	6	Soporte motor	0,298 kg	Aluminum 7075
5	6	Brazo - Tubo	0,238 kg	aluminio 6005
6	6	Placa abrazadera	0,023 kg	Aluminum 7075
7	6	Abrazadera	0,120 kg	Aluminum 7075
8	1	Placa Superior	1,028 kg	Aluminum 7075
9	2	Soporte boquilla	0,050 kg	Plástico

Tolerancias		Peso		Título	
				Ensamble hexacóptero	
	Fecha	Nombre			Hoja
Dib.	10/9/2020	C. González - M. Bajaña			A4
Rev.	15/9/2020	M. Fajardo, P.hD			
Aprob.	18/9/2020	M. Fajardo, P.hD.			
Firmas		N° Plano			espol
		9			
		Sustitución			

Hexacóptero para fumigación

espol