

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

Diseño de un robot agrícola para la recopilación de información de la  
enfermedad Sigatoka Negra en las plantaciones de banano

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingenieros en Mecatrónica**

Presentado por:

Luis Orlando Armijos Cevallos

Lorena Sthefany Campoverde Vilela

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2021

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a familia, quienes siempre me han brindado su amor y apoyo ante cualquier situación. Su ejemplo de valentía y perseverancia han hecho de mí una persona fuerte y decidida. Y sin ser menos importante, a mi perrito Joshy, el cual me ha acompañado durante cada una de mis etapas educativas, dándome ánimo en forma de lamiditas.

**Lorena Campoverde**

Este proyecto se lo dedico a mi familia, en primer lugar, a mi mamá, que desde el cielo me ha estado cuidando y siempre ha sido ella una motivación para tratar de ser una gran persona y que se sienta orgullosa de mí, y a mi papá y a mi hermana por haberme brindado ese apoyo condicional y haber sido un gran soporte todos estos años.

**Luis Armijos**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por sus bendiciones a lo largo de mi vida. A mi familia por los consejos y el apoyo durante este logro. Al Ingeniero Christian Tutivén quien, como tutor, nos guio para desarrollar este proyecto. Y a mi amigo Pablo Villa por brindarme su más sincera amistad desde el pre hasta la actualidad.

**Lorena Campoverde**

Un eterno agradecimiento a Dios por todas sus bendiciones a lo largo de mi vida. A mi familia, por haber sido esa guía, ejemplo y apoyo, ayudándome a seguir adelante y que pueda cumplir todos mis sueños. También, a mi tutor, el ingeniero Christian Tutivén, quien ha sido una gran guía para lograr desarrollar este trabajo. Finalmente, a Shirley Lucina, quien ha sido mi compañera de vida durante muchos años y ha estado conmigo en las buenas y en las malas, definitivamente siempre tendrá un lugar en mi corazón.

**Luis Armijos**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Luis Orlando Armijos Cevallos y Lorena Sthefany Campoverde Vilela, 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”



Luis Orlando Armijos Cevallos



Lorena Sthefany Campoverde Vilela

# EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:  
**BRYAN JOAO  
PURUNCAJAS  
MAZA**



Firmado electrónicamente por:  
**CHRISTIAN  
JAVIER TUTIVEN  
GALVEZ**

---

**Bryan Puruncajas, M.Sc.**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Christian Tutiven, Ph.D.**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En Ecuador, el sector bananero representa el 50% del PIB agrícola, lo cual implica que existe una elevada demanda del producto a nivel mundial, por lo cual, los cultivos deben aprobar controles de condición fitosanitarias, en donde, se verifique que no existe la presencia de ninguna enfermedad propia del banano.

Una de las enfermedades más comunes es la Sigatoka Negra, la cual provoca síntomas principalmente en las hojas. Ante esto, se tiene como objetivo diseñar un robot agrícola para la adquisición de información de esta enfermedad en las plantaciones para su detección de manera temprana.

En la elaboración de este proyecto se utilizaron los softwares CES EduPack 2019 y Autodesk Inventor Professional 2021, para el diseño mecánico, mientras que para el diseño de la planificación de vuelo se usó el software Mission Planner ArduPilot, el cual permite también el control dinámico para vehículos no tripulados.

El sistema final posee unas dimensiones de 595 mm de largo y 595 mm de ancho, y una altura de 211 mm. Además, su peso total es de 4 kg, con una carga útil de 0.5 kg, diseñado con aleaciones de aluminio y fibra de carbono, esto lo convierte en un sistema ligero y resistente con un costo total de \$5947.50, menor en comparación con los del mercado.

En conclusión, el presente diseño será capaz de realizar la recopilación de datos de la enfermedad de forma eficiente para un control temprano, ayudando a reducir costos extras de importación e impuestos, con características personalizadas para el cliente.

**Palabras Clave:** Banano, sigatoka negra, robot, control, recopilación.

## **ABSTRACT**

*In Ecuador, the banana sector represents 50% of the agricultural GDP, which implies that there is a high demand for the product worldwide. Crops must pass phytosanitary condition controls, where it is verified that there is no presence of any banana disease.*

*One of the most common diseases is Black Sigatoka, which causes symptoms mainly on the leaves. Therefore, the objective is to design an agricultural robot for the acquisition of information on this disease in the plantations for its early control.*

*In the development of this project, CES EduPack 2019 and Autodesk Inventor Professional 2021 software were used for the mechanical design, while the Mission Planner ArduPilot software was used for the flight planning design, which also allows dynamic control for unmanned vehicles.*

*The final system has dimensions of 595 mm in length and 595 mm in width, and a height of 211 mm. In addition, its total weight is 4 kg, with a payload of 0.5 kg, and being made of aluminum alloys and carbon fiber, this makes it a light and resistant system with a total cost of \$5947.50, lower compared to those in the market.*

*In conclusion, the present design will be able to perform disease data collection efficiently for early control, helping to reduce extra import and tax costs, with customized features for the client.*

**Keywords:** *Banana, Black Sigatoka, robot, control, collection.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
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 .....	3
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	5
1.4.1 Sector bananero ecuatoriano.....	5
1.4.2 Tipos de enfermedades .....	5
1.4.3 Métodos de detección.....	8
1.4.4 Robots agrícolas.....	8
1.4.5 Estado del arte.....	10
CAPÍTULO 2 .....	12
2. METODOLOGÍA.....	12
2.1 Alternativas de solución.....	12

2.1.1	Selección de robot agrícola.....	12
2.1.2	Selección de cámara .....	13
2.2	Metodología del proceso a seguir.....	15
2.3	Requerimientos de diseño .....	17
2.4	Especificaciones técnicas.....	17
2.5	Diseño Conceptual .....	18
2.6	Diseño de detalle.....	19
2.6.1	Dron seleccionado y configuración de motores.....	19
2.6.2	Sistema de adquisición de información .....	20
2.7	Modelo matemático .....	21
2.8	Cálculos .....	22
2.8.1	Potencias del dron .....	23
2.8.2	Tiempo de vuelo .....	30
2.9	Diseño Electrónico .....	31
2.9.1	Selección de controlador de vuelo .....	31
2.9.2	Diagrama de conexiones eléctricas .....	33
2.10	Diseño Mecánico.....	34
2.10.1	Selección de material .....	34
2.10.2	Diseño de estructura .....	35
2.11	Arquitectura de control .....	37
2.11.1	Sistema de control.....	38
2.11.2	Selección de software de planificación de vuelo.....	38
2.11.3	Control de vuelo .....	39
CAPÍTULO 3 .....		42
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	42
3.1	Dimensiones del dron.....	42
3.2	Análisis de elementos finitos .....	43

3.3	Configuración de ruta de vuelo .....	46
3.4	Proceso de fotogrametría .....	49
3.5	Simulación de adquisición de información .....	50
3.6	Análisis de costos.....	53
3.6.1	Análisis de mercado.....	54
CAPÍTULO 4 .....		56
4.	Conclusiones Y Recomendaciones .....	56
4.1	Conclusiones.....	56
4.2	Recomendaciones.....	58
ANEXOS .....		67

## ABREVIATURAS

PIB	Producto Interno Bruto
ESC	Electronic Stability Control
ONU	Organización de Naciones Unidas
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
VANT	Vehículo Aéreo no Tripulado
UGV	Unmanned Ground Vehicle
RGB	Red, Green, Blue
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
ACFR	Facultad de Ingenierías y Tecnologías de la Información del Centro Australiano de Robótica de Campo
NIR	Near Infrared Range
GDL	Grados de Libertad
TCM	Teoría de Cantidad de Movimiento
LiPo	Litio y Polímero
PID	Control Proporcional Integral Derivativo

## SIMBOLOGÍA

ha	Hectáreas
m	Metros
g	Gramos
kg	Kilogramos
h	Altura máxima
$\rho_o$	Densidad de aire estándar a nivel de mar
kgf	Kilogramo-fuerza
T	Empuje
$v_i$	Velocidad inducida del motor
$P_i$	Potencia necesaria
A	Área
W	Watts
K	Factor de corrección
FM	Factor de merito
$v_a$	Velocidad de avance
$f_s$	Factor de servicio
A	Amperios
V	Voltios
mAh	Miliamperios horas
Ah	Amperios horas
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
min	Minutos
s	Segundos

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Maduración temprana del banano causada por moko. ....	6
Figura 1. 2 Etapas de la infección de Sigatoka Negra en banano. ....	7
Figura 1. 3 Detección visual de enfermedades. ....	8
Figura 2. 1 Criterios escogidos para la selección del robot agrícola. ....	13
Figura 2. 2 Matriz de decisión para selección del robot agrícola. ....	13
Figura 2. 3 Criterios escogidos para la selección de la cámara. ....	14
Figura 2. 4 Matriz de decisión para selección de la cámara. ....	14
Figura 2. 5 Flujograma del proceso de diseño del proyecto. ....	16
Figura 2. 6 Diseño conceptual de la solución propuesta. ....	18
Figura 2. 7 Configuración de rotores del cuadricóptero en X. ....	19
Figura 2. 8 Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos. ....	20
Figura 2. 9 Posición y elaboración de un cuadricóptero. ....	21
Figura 2. 10 Hélices APC1047. ....	25
Figura 2. 11 Regímenes de trabajo de vuelo axial descendente. ....	27
Figura 2. 12 Variabilidad de la velocidad inducida en vuelo axial descendente. ....	28
Figura 2. 13 Diagrama eléctrico del proyecto. ....	33
Figura 2. 14 Diagrama de la estructura mecánica del dron. ....	35
Figura 2. 15 Estructura mecánica del dron. ....	37
Figura 2. 16 Arquitectura de control de un dron cuadricóptero. ....	38
Figura 2. 17 Ventana de PIDs del Dron en Mission Planner. ....	40
Figura 3. 1 Vista isométrica del vehículo aéreo no tripulado. ....	42
Figura 3. 2 Vista frontal del vehículo aéreo no tripulado. ....	43
Figura 3. 3 Análisis de elementos finitos del brazo (Tensión de Von Mises). ....	44
Figura 3. 4 Análisis de elementos finitos del brazo (Tensión de Von Mises). ....	44
Figura 3. 5 Análisis de elementos finitos del brazo (Desplazamiento). ....	45
Figura 3. 6 Análisis de elementos finitos de la base (Tensión de Von Mises). ....	45
Figura 3. 7 Análisis de elementos finitos de la base (Desplazamiento). ....	46
Figura 3. 8 Patrón de movimiento Back and forth. ....	46

Figura 3. 9 Área de trabajo en una muestra.....	47
Figura 3. 10 Puntos determinados para una hectárea. ....	48
Figura 3. 11 Plan de vuelo del dron en un lote.....	48
Figura 3. 12 Campo de visión de la cámara.....	49
Figura 3. 13 Levantamiento fotogramétrico con dron de 4 rotores. ....	50
Figura 3. 14 Plan de vuelo dividido en intervalos. ....	50
Figura 3. 15 Componentes para simulación en Proteus. ....	51
Figura 3. 16 Simulación de adquisición de datos. ....	52
Figura 3. 17 Archivo .txt creado. ....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Requerimientos para el diseño del robot agrícola. ....	17
Tabla 2. 2 Especificaciones técnicas para el diseño del dron. ....	18
Tabla 2. 3 Comparación entre el controlador Pixhawk, Naze32 y Navio2. ....	32
Tabla 2. 4 Especificaciones técnicas para el diseño del dron. ....	34
Tabla 2. 5 Especificaciones técnicas para el diseño del dron. ....	36
Tabla 2. 6 Comparación entre software ArduPilot, CleanFlight y BetaFlight. ....	39
Tabla 3. 1 Presupuesto para la construcción del cuadricóptero. ....	53
Tabla 3. 2 Comparación de modelos de drones agrícolas en mercado internacional. .....	55

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Ensamble del Cuadricóptero
PLANO 2	Plataforma Central
PLANO 3	Base Superior
PLANO 4	Brazo
PLANO 5	Tren de Aterrizaje
PLANO 6	Soporte Cámara
PLANO 7	Soporte Cámara
PLANO 8	Soporte Cámara

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector bananero es una de las actividades agrícolas más importantes para el Ecuador, debido que implica el 2% del PIB general y el 35% del PIB agrícola según el artículo presentado por el Ministerio de Comercio Exterior en el 2017 [1]. Aproximadamente un 17% de la población actual se dedica a esta actividad, transformándola en la labor más desarrollada del país y de mayor crecimiento debido a la continua creación de plazas de trabajo [2].

La elevada demanda de este cultivo a nivel mundial significa que debe pasar por distintos controles físicos, así como también de condición fitosanitarias, en donde se evita que cuente con alguna plaga o enfermedad, caso contrario no serán aceptadas para exportación al mercado internacional.

La Sigatoka Negra es una de las enfermedades de mayor presencia en los cultivos de banano, proviene del hongo *Mycosphaerella fijiensis*, presentando síntomas principalmente en las hojas y siendo capaz de echar a perder plantaciones enteras en caso de no controlarla [3].

Con el paso de los años, la robótica ha ido tomando fuerza en la agricultura con el fin de disminuir los costos, mejorar la productividad y la calidad de los cultivos. Una ventaja relevante del uso de robots dentro de este sector, es que reducen vastamente el desperdicio de recursos. Según un informe realizado por la Universidad Harper Adams, actualmente se malgasta hasta un 80% de químicos durante el rocío en plantaciones, prediciendo que con ayuda de los robots será posible hacerlo únicamente a los cultivos con síntomas y reservar hasta un 60% de producto [4].

En Ecuador, el mercado de los robots dentro del sector agrícola tiene un crecimiento moderadamente lento debido a el país no cuenta con la

infraestructura y el desarrollo científico necesario para que esta tecnología sea utilizada por los trabajadores, a diferencia de países de primer mundo, en donde su uso es común y de gran beneficio para los agricultores y sus cultivos [5].

Ante esto, el presente proyecto de titulación tiene como finalidad el diseño de un robot agrícola que permita recopilar información sobre la enfermedad de la Sigatoka Negra. Además, será capaz de detectar datos ambientales a través de sensores debido a que la afección se encuentra relacionada a las condiciones climáticas.

## **1.1 Descripción del problema**

El banano es uno de los productos de mayor consumo en el Ecuador y a su vez de mayor exportación, debajo del petróleo y el camarón. Aproximadamente el 70% de todo el banano producido en el Ecuador es exportado a diferentes países del mundo, y su demanda ha aumentado con el pasar de los años.

Sin embargo, este sector agrícola presenta problemas a causa de la continua presencia de enfermedades, tales como moko, el virus del rayado del banano y la sigatoka negra, siendo este último la enfermedad que más aqueja a los productores, ya que produce daños de más del 50% en el rendimiento de la producción del banano, por lo que cada vez es necesario el uso de productos químicos más agresivos y controles preventivos para erradicarla, aumentando gastos de producción [6].

Por otro lado, en el país los métodos para el control de enfermedades no son eficientes, debido a que la mayoría se realizan de forma manual y sin el adecuado análisis, necesitando gran cantidad de tiempo y recursos para su detección en toda la plantación, perdiendo cultivos en el proceso, dado que el control no es el adecuado [7]. Mientras que los sectores bananeros más desarrollados, los cuales poseen capital para la inversión de sistemas más

eficientes, tienen el problema de que al menos el 20% de los costos de producción (\$900/ha) es invertido tanto en implementación como mantenimiento, y se requiere de personal capacitado [8].

Finalmente, no hay que olvidar que Ecuador no posee la tecnología para mejorar los cultivos a través de la genética como realizan otros países con el fin de crear nuevas variedades de banano que sean inmunes a las enfermedades o plagas, por esta razón, se necesita de métodos o sistemas que sean eficientes en la recolección de datos para la detección temprana de enfermedades, y así reducir recursos y pérdidas en la producción.

## **1.2 Justificación del problema**

La razón de implementar un sistema para el cuidado de las plantas de banano es que el sector bananero tiene la necesidad de detectar y controlar de manera temprana las enfermedades que afectan a sus cultivos, evitando invertir en costosos recursos, como estudios en laboratorios, contratación de personal especializado, y sobre todo gastos excesivos en productos químicos, los cuales pueden influir hasta un 35% del costo total de producción [9].

Aparte de lo mencionado anteriormente, la industria bananera se beneficiará del aumento de la producción sin necesidad de incrementar recursos, debido a que no habrá pérdidas materiales ni económicas. Además, se minimizaría el impacto ambiental provocado por los pesticidas, al utilizar menos productos químicos, logrando una agricultura sostenible. A su vez, otro beneficiario es el consumidor, ya que se tendría un producto más saludable, generando confianza y mayor aceptación en el mercado.

Cabe destacar, el robot agrícola servirá de apoyo en el cumplimiento de la actividad, sin necesidad de reemplazar el talento humano anteriormente utilizado puesto que el robot trabajará continuamente durante una gran parte del día, desde las siete de la mañana hasta las seis de la noche.

Finalmente, al utilizar un robot agrícola, se resalta la automatización del proceso de recolección de datos para detección de la enfermedad, Sigatoka Negra, reduciendo el esfuerzo humano y aumentando la efectividad y eficiencia de la actividad debido a que, en comparación con el trabajo realizado por un agricultor, el cual puede verse afectado por distintos factores como cansancio, problemas de salud, entre otras, el robot será capaz de realizar sus obligaciones sin interrupciones, transmitiendo la información a través de la red y con menos errores.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un robot agrícola para la recopilación de información de la enfermedad Sigatoka Negra en las plantaciones de banano, a través de un sistema de sensores y cámara.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Seleccionar el tipo de robot y los distintos elementos a utilizar para el diseño del proyecto.
- Diseñar el sistema mecánico y electrónico del robot para la recolección de datos.
- Validar el diseño de la estructura del robot agrícola a través de un análisis de elementos finitos, para conocer si el sistema será capaz de soportar las cargas que experimentará.
- Planificar la ruta de vuelo que realizará el robot mediante software y determinar el tiempo de trabajo.
- Realizar un análisis de costos del producto final con respecto a los que se ofertan en el mercado.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Sector bananero ecuatoriano**

La agricultura en el Ecuador representa un factor de gran importancia en el desarrollo de la economía, siendo la principal fuente de empleo, generando más de 2,2 millones de trabajos en el año 2019 y beneficiando al comercio gracias a su aporte del 8% al PIB anual del país [10]. El banano es uno de los productos fundamentales de exportación al mercado internacional, por lo cual, el sector bananero significa un eje principal de crecimiento económico y social para el país.

Según la ONU, para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en 2018, las exportaciones de este cultivo desde el país fueron del 34,86% a nivel mundial. Mientras que, en el mercado nacional, ese mismo año se obtuvo un ingreso total de ventas de aproximadamente \$33 millones de dólares, lo que implica que esta actividad tiene un peso importante dentro del PIB agrícola y en la generación de divisas [11].

Este sector es una de las actividades agrícolas de mayor desarrollo en el país debido a su alta demanda por parte de la Unión Europea, Europa del Este y Asia. Además, su crecimiento se debe a las nuevas siembras, su costo y la gran cantidad de compañías dedicadas a la exportación de este producto. De acuerdo con un informe emitido por parte del Ministerio de Comercio Exterior, en el año 2017, las provincias en donde se congrega la producción de banano son: El Oro con el 41%, Guayas con el 34% y Los Ríos con el 16% [12].

### **1.4.2 Tipos de enfermedades**

En el Ecuador, las plantaciones de banano son propensas a plagas y enfermedades, y debido a que el sector bananero es un mercado importante en la economía del país, se trabaja constantemente para prevenir su ingreso y/o propagación. Las enfermedades que provocan más daño en las plantaciones del

banano en el país son moko, que es capaz de destruir el 100% de la producción, sigatoka negra, que afecta en un 50% el rendimiento del cultivo y el deterioro que provoca en la calidad de banano lo hace no exportable, y el virus del estriado, el cual, si no se controla debidamente, es capaz de resurgir convirtiéndose en un grave problema [13].

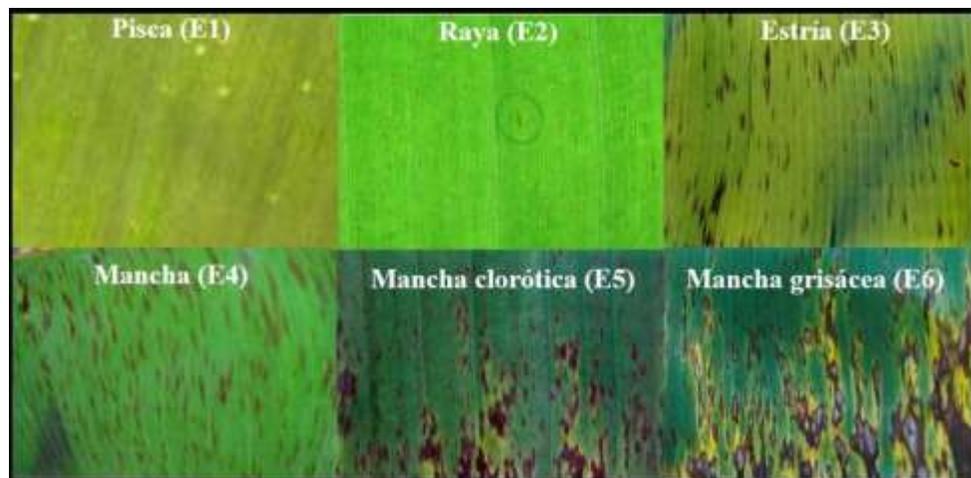
La enfermedad del moko proviene de la bacteria *Ralstonia solanacearum* y se caracteriza por marchitar a la planta y provocar que las hojas pierdan su color verde manifestándose un color amarillo-verdoso, por esta razón las hojas terminan secándose y rompiéndose, aunque algo que destacar es que no se salen de la planta. Por otro lado, los frutos también pueden verse afectados por la enfermedad, ya que en ocasiones se maduran antes de tiempo (Figura 1.1), y esto es un gran problema a la hora de la exportación, dado que el racimo no debe madurar mientras dura el viaje [14].



**Figura 1. 1 Maduración temprana del banano causada por moko [15].**

Otra enfermedad es la sigatoka negra causada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis*, y considerada una de las más peligrosas debido a su capacidad de destruir a las hojas del banano, provocando que el tamaño de la

planta de banano se vea alterado, y en consecuencia el de los racimos y frutos, disminuyendo su peso, y en ciertos casos produce que el fruto se madure antes de tiempo, convirtiéndose un problema a la hora de exportar. Los síntomas se presentan en seis etapas (Figura 1.2), los cuales comienzan con lesiones pequeñas en las hojas de color amarillo, apareciendo rayas de color café rojizo, las cuales se alargan convirtiéndose en manchas negras y cafés, y terminan secando a la hoja. Cabe destacar, el hongo tiene mayor efecto en ambientes húmedos, con temperaturas entre 23 a 28 °C [16].



**Figura 1. 2 Etapas de la infección de Sigatoka Negra en banano [17].**

Finalmente, no hay que olvidar la enfermedad Fusarium 1, un hongo que devastó una gran cantidad de banano de seda en 1962 en el Ecuador, dejando a muchos productores sin sus cultivos. Lo peor de esta enfermedad, era que mataba a las plantaciones de banano, dado que se alimentaba de sus raíces, por esta razón se dejó de sembrar este tipo de banano, y se lo cambió por el Cavendish, el cual era inmune a este hongo. Sin embargo, con el pasar de los años ha mutado, y hoy en día está la Fusarium 4, más peligrosa dado que ya es capaz de matar a la Cavendish. Si bien aún no ha entrado a Ecuador, ya existen registros en el país vecino Colombia de la aparición de esta plaga, por lo que es cuestión de tiempo para que llegue al país, en especial si no se toma las respectivas medidas [18].

### 1.4.3 Métodos de detección

Los cultivos de banano se ven afectados por la presencia de plagas y enfermedades, lo cual puede estropear ciertas partes de la planta y en ciertos casos hasta dañarla completamente, perjudicando a gran parte de la plantación. Ante estos problemas, se realizan métodos de detección de plagas y enfermedades, los cuales dependerán del tipo de productor (pequeño, mediano y grande) y el tipo de banano [19].

Para la determinación de enfermedades, en unos casos se emplea la detección visual de las partes de la planta, como las hojas y pseudotallo para medir el nivel de severidad. En otros, se realizan estudios in vitro para aislar los hongos que se encuentren en muestras de las plantas y lograr identificarlos [14].



**Figura 1. 3 Detección visual de enfermedades** [20].

Actualmente, el desarrollo tecnológico ha brindado eficientemente nuevas técnicas de detección de plagas y enfermedades al sector bananero, desde test rápidos de distintos hongos hasta la creación de aplicaciones móviles que a través de reconocimiento de imágenes permite determinar enfermedades, lo cual implica mayor rapidez que los métodos tradicionales [21].

### 1.4.4 Robots agrícolas

Un robot agrícola es utilizado para la automatización de las tareas agrícolas, como por ejemplo la cosecha de cultivos por medio de grippers (robots

recolectores), la monitorización del estado de las plantas, el control de plagas, robots tractores autónomos, etc. Cabe destacar, el robot es autónomo, es decir es capaz de navegar e interactuar en un entorno, sin la intervención humana. En consecuencia, el robot puede desplazarse en el campo, ya sea en invernaderos (campo interior) o en áreas abiertas (campo exterior), movilizándose a través de cada uno de los cultivos y al terminar su tarea regresar a su punto de partida o entrega [22].

Existen dos tipos de robots agrícolas, que a pesar de que son capaces de realizar una misma actividad, se diferencian en su forma de comportarse. El robot agrícola terrestre como su nombre lo indica es capaz de moverse en la superficie terrestre, y suele conocerse como un vehículo terrestre autónomo (UGV), mientras que el robot aéreo agrícola es comúnmente conocido como dron. Se diferencian respecto al ambiente donde trabajan, y hay tareas agrícolas que son más aptas para el robot terrestre, mientras que otras para el dron [23].

Por ejemplo, para tareas de laboreo, fumigación y cosechado suele emplearse robots agrícolas terrestres, ya que en estos se suelen implantar brazos robóticos o mecanismos que permitan tomar alguna acción de acuerdo a lo analizado por el sistema, mientras que el dron se utiliza más cuando se trata de capturar información, por medio de cámaras o sensores se es capaz de conocer el estado de los cultivos, su necesidad de nutrientes, o el estado de irrigación, permitiendo tomar datos a áreas grandes, aunque también pueden ser utilizados para fumigación, aportando esa precisión y focalización del tratamiento. En ambos casos, poseen componentes como sensores, cámaras, visión computarizada, mapas 3D, etc., los cuales conforman el cerebro virtual del vehículo, permitiéndole moverse en su respectivo entorno, y tomar decisiones [24].

### 1.4.5 Estado del arte

El uso de robots e inteligencia artificial para la realización de tareas agrícolas es algo que está tomando impulso, debido a la necesidad de aumentar la producción de los cultivos, sin aumentar recursos y que el impacto al ambiente sea el mínimo posible. Es evidente que el crecimiento poblacional ha provocado que se necesite cada vez mayor producción agrícola, sin embargo, los recursos naturales como el agua, el suelo, requieren de un respiro, y los métodos y maquinaria utilizados en la actualidad no van a ser suficientes para satisfacer las necesidades a futuro y por esta razón, ya hay empresas y organizaciones trabajando en un cambio.

Por ejemplo, en México, distintos investigadores lograron procesar imágenes para determinar las plagas presentes en las plantaciones de banano, empleando cámaras RGB con sensores CMOS integrados a vehículos aéreos no tripulados para la recolección de información y posteriormente, utilizaron la herramienta Image Processing Toolbox del software matemático MATLAB para el análisis e identificación de las afecciones [25].

El robot omnidireccional RIPPA fue diseñado por personal de la Facultad de Ingeniería y Tecnologías de la Información del Centro Australiano de Robótica de Campo (ACFR), con el fin de mejorar actividades agrícolas, como el control de afecciones, identificar objetos ajenos al campo, entre otras condiciones de los cultivos. Este robot móvil cuenta con una cámara RGB-NIR de alta velocidad y detección que, con ayuda de algoritmos de inteligencia artificial y sensores hiper espectrales, térmicos, infrarrojos, visión panorámica y GPS, le es posible cumplir las actividades deseadas. Además, es ecológico debido a que recarga su sistema con energía solar, por lo cual puede estar activo por mucho tiempo [26].

El grupo holandés, Triple20, implementó en Filipinas vehículos no tripulados integrados a un sistema de cámaras que detectan enfermedades en

los cultivos de banano por medio de la toma de imágenes hiper espectrales, para luego mediante técnicas de machine learning determinar si la planta se encuentra afectada o no. A su vez, cumple con la función de rociar las plantaciones con productos químicos fitosanitarios adecuados [27].

Todas estas investigaciones han aportado al avance tecnológico agroindustrial, permitiendo fortalecer sus distintas actividades e impulsando su crecimiento. Por lo cual, estos estudios han sido tomados como referencia para el desarrollo del presente proyecto a través del uso de datos relevantes que permitan lograr el objetivo propuesto de diseñar un robot agrícola que sea capaz de recopilar información sobre la enfermedad Sigatoka Negra.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta un análisis de las distintas alternativas de solución consideradas para la selección del robot agrícola y su cámara, un flujograma que detalla los pasos a seguir para el cumplimiento del proyecto y el diseño respectivo del sistema.

### 2.1 Alternativas de solución

En esta sección se realizó un proceso de selección del robot agrícola más adecuado y su cámara, para la solución de la problemática y cumplimiento de los objetivos planteados, a través de criterios propuestos para el desarrollo de la matriz de decisión en cada caso.

#### 2.1.1 Selección de robot agrícola

Se detallan las alternativas de robots agrícolas que se consideraron para el presente proyecto: dron de 4 rotores, dron de 6 rotores y un robot móvil omnidireccional.

Los criterios tomados en cuenta para su selección fueron los siguientes:

- Menor tamaño, para que no requiera de un gran espacio de almacenamiento.
- Bajo costo de mantenimiento, ya que se debe minimizar gastos en recursos.
- Capacidad de carga moderada, para que el sistema sea capaz de soportar el peso de todos los componentes que llevará.
- Precio moderado, debido que el cliente no desea invertir en algo costoso.
- Elevado tiempo de operación, dado que se necesita recopilar la mayor cantidad de información sobre las plantaciones en el periodo de tiempo mencionado en la lista de requerimientos.

- Alta confiabilidad, ya que se trata de colocar este sistema en el mercado, con el objetivo de dejar a un lado las prácticas convencionales de detección.

En la Figura 2.1 se indican los criterios anteriormente descritos, con sus respectivas prioridades. Finalmente, en la Figura 2.2 se presenta la matriz de decisión, en donde se observa que la solución del dron agrícola de cuatro rotores fue la mejor situada, con un poco de diferencia respecto al de seis rotores, seguido del robot terrestre agrícola, lo cual implica que ambas opciones de robots aéreos son factibles.

			Peso Total	12
Peso	Criterio	Prioridad	% de decisión	
1	Tamaño	6	8%	
1.5	Mantenimiento	5	13%	
1.8	Carga	4	15%	
2.2	Precio	3	18%	
2.5	Tiempo de operación	2	21%	
3	Confiabilidad	1	25%	

Figura 2. 1 Criterios escogidos para la selección del robot agrícola.

Opciones	CRITERIO						RESULTADOS		
	1	1.5	1.8	2.2	2.5	3	PUNTAJE SIN PESO	PUNTAJE CON PESO	PRIORIDAD
Dron agrícola de cuatro rotores (cuadricóptero)	8	8	3	8	4	7	38	74	1
Dron agrícola de seis rotores (hexacóptero)	7	7	5	6	3	8	36	71.2	2
Robot terrestre agrícola omnidireccional	3	4	7	3	8	5	30	63.2	3

Figura 2. 2 Matriz de decisión para selección del robot agrícola.

### 2.1.2 Selección de cámara

Se presentan las distintas opciones de cámaras para la recopilación de información: cámara NIR, cámara RGB y cámara multiespectral.

Los criterios considerados para su selección fueron los siguientes:

- Menor tamaño, para que no requiera de un soporte tan robusto.
- Menor peso, para que no afecte a la carga muerta del dron.
- Capacidad de bandas espectrales, para que el sistema sea capaz de medir la luz dentro del espectro visible.
- Óptimo para el área de trabajo, ya que el proyecto se basa en la agricultura de precisión.

			Peso Total	8
Peso	Criterio	Prioridad	% de decisión	
1	Tamaño	4	13%	
1.5	Peso	3	19%	
2.5	Óptimo	2	31%	
3	Capacidad bandas espectrales	1	38%	

Figura 2. 3 Criterios escogidos para la selección de la cámara.

Opciones	Pesos ->				RESULTADOS		
	1	1.5	2.5	3			
	Tamaño	Peso	Óptimo	Capacidad bandas espectrales	PUNTAJE SIN PESO	PUNTAJE CON PESO	PRIORIDAD
Cámara NIR	2	2	1	1	6	10.5	3
Cámara Multiespectral	4	4	5	5	18	37.5	1
Cámara RGB	3	3	2	3	11	21.5	2

Figura 2. 4 Matriz de decisión para selección de la cámara.

La importancia de cada uno de los criterios se detalla en la Figura 2.3, mientras que en la Figura 2.4 se observa la matriz de decisión, en donde la cámara multispectral se destacó como la solución.

## **2.2 Metodología del proceso a seguir**

En la Figura 2.5 se presenta un flujograma de las etapas a seguir para el desarrollo del proyecto, en donde se inicia con conocer el problema, proponer alternativas y elegir una solución para posteriormente realizar modelos, análisis y seleccionar elementos con el fin de cumplir con el diseño de un dron agrícola.

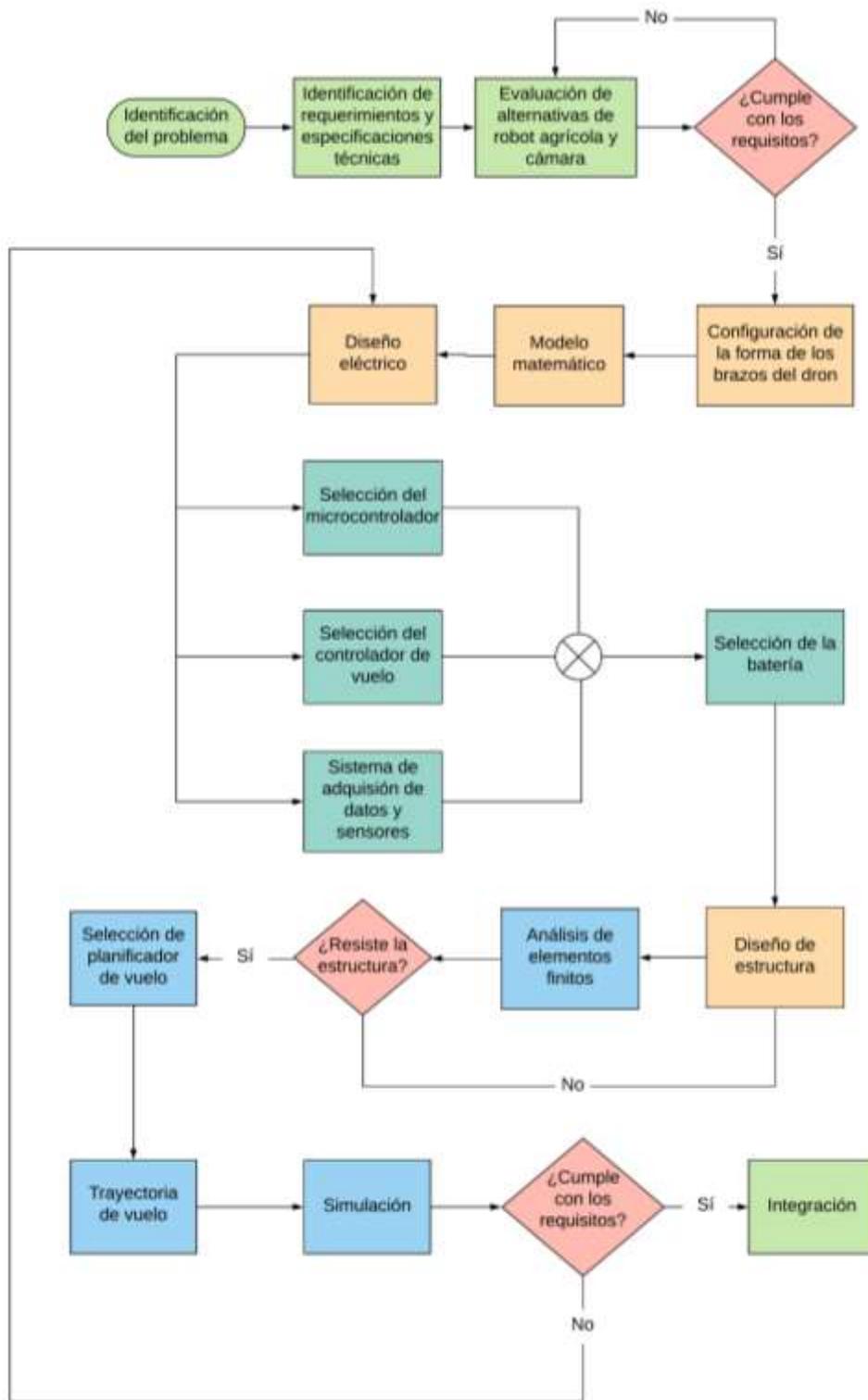


Figura 2. 5 Flujograma del proceso de diseño del proyecto.

### 2.3 Requerimientos de diseño

Para el diseño de un robot agrícola que recopile información sobre la Sigatoka Negra se realizó una reunión con el cliente, José Alcoser, quien dio a conocer los requisitos del proyecto. Por lo cual, en la Tabla 2.1, se presenta las características solicitadas.

**Tabla 2. 1 Requerimientos para el diseño del robot agrícola.**

<b>Autónomo</b>	El robot no debe requerir de un operario.
<b>Costo</b>	Su precio no debe ser tan elevado, la inversión debe ser rentable.
<b>Mantenimiento</b>	Bajo costo de mantenimiento.
<b>Período de operación</b>	Durante el día, entre las 07h00 a 18h00.
<b>Funcionalidad</b>	Recopilación de datos sobre la enfermedad e información de la temperatura y humedad del ambiente por medio de sensores.
<b>Tamaño</b>	Adaptable, no debe requerir de un gran espacio para su almacenamiento.
<b>Impacto Ambiental</b>	Funcionamiento amigable con el medio ambiente.
<b>Fabricación y Montaje</b>	Construcción simple y de fácil acceso a posibles elementos defectuosos.

### 2.4 Especificaciones técnicas

Para el diseño del dron agrícola se decidieron las siguientes especificaciones técnicas, tomando en cuenta los drones de cuatro rotores del mercado que realicen funciones parecidas. A continuación, en la Tabla 2.2 se detalla los parámetros del sistema.

**Tabla 2. 2 Especificaciones técnicas para el diseño del dron.**

<b>Tiempo de vuelo</b>	Aproximadamente 30 minutos
<b>Altitud de vuelo</b>	100 m sobre el nivel de la tierra
<b>Altura de toma de datos</b>	10 m sobre el cultivo
<b>Modo de despegue</b>	Vertical
<b>Peso (Carga muerta)</b>	Menor o igual 4000 g
<b>Carga útil</b>	500 g
<b>Almacenamiento</b>	Tarjeta SD

## 2.5 Diseño Conceptual

En la Figura 2.6 se observa el diseño conceptual del robot agrícola propuesto. El sistema consiste en un robot aéreo no tripulado de cuatro hélices, compuesto de una cámara multispectral es su parte inferior para la toma de fotos de las plantaciones de banano mientras realiza el sobrevuelo de los cultivos durante el día, entre las 7 de la mañana hasta las 6 de la tarde, y posee sensores de humedad y temperatura para conocer las condiciones climáticas del ambiente. Toda esta información, podrá ser visualizada en un ordenador a través de una tarjeta SD, con el fin de conocer la salud de los cultivos.



**Figura 2. 6 Diseño conceptual de la solución propuesta.**

## 2.6 Diseño de detalle

Antes de realizar cualquier tipo de diseño, es necesario determinar y seleccionar la forma del dron y la configuración de sus motores, al igual que su metodología de vuelo, los cuales se presentan en la sección 2.6.1.

Además, se debe conocer el funcionamiento del sistema de comunicación para la recopilación de información de la enfermedad en las plantaciones de banano, el cual se detalla en la sección 2.6.2.

### 2.6.1 Dron seleccionado y configuración de motores

El dron cuenta con 4 motores, los cuales le brindan mayor rapidez, estabilidad y potencia que uno de menos rotores. Además, su carga útil es superior, por lo cual permite agregar más elementos aparte del sistema de adquisición de datos para que sea transportado sin ningún problema.

La configuración de los motores es en forma “X”, tal como se observa en la Figura 2.7, en donde los motores se encuentran en el mismo nivel. Dos de ellos giran en contra de las manecillas del reloj y los otros dos en el sentido contrario.

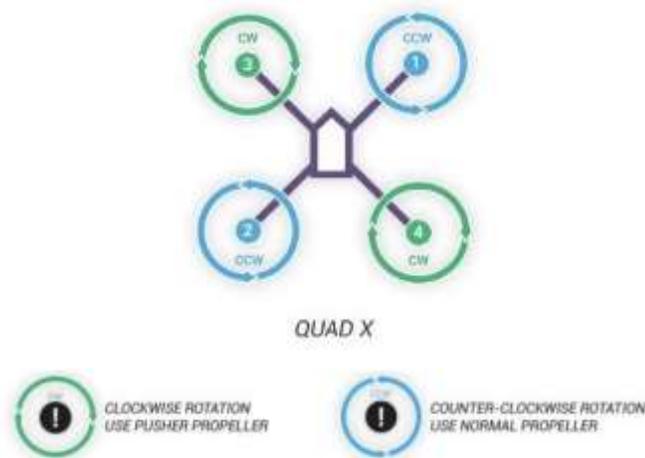


Figura 2. 7 Configuración de rotores del cuadricóptero en X [28].

## 2.6.2 Sistema de adquisición de información

A continuación, en la Figura 2.8 se presenta un diagrama del sistema de adquisición de información del dron agrícola, el cual es apto para la toma de imágenes y registro de posición, tiempo, orientación de los ángulos de navegación y demás datos de los sensores.

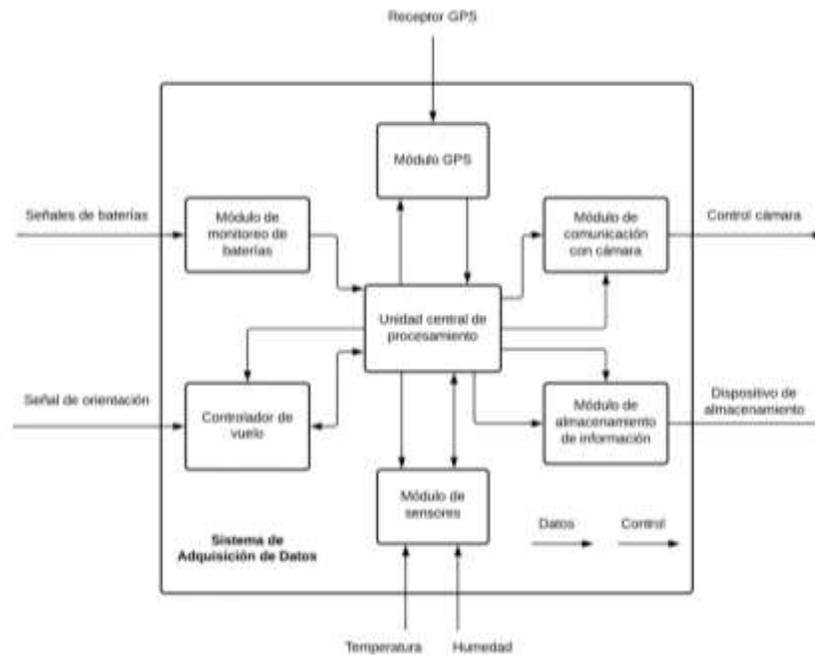


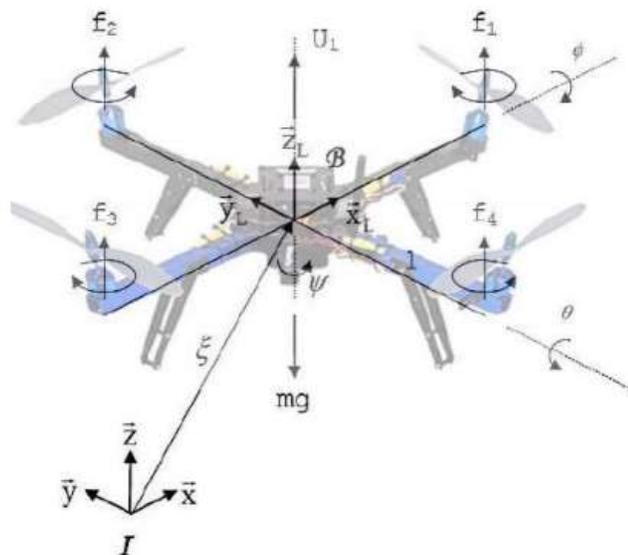
Figura 2. 8 Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos.

- **Unidad de procesamiento:** Es el equipo al cual se envían y se almacenan los datos de los elementos enlazados a esta. Además, se encarga de la comunicación a tierra y de controlar la velocidad de disparo de la cámara.
- **Controlador de vuelo:** Este elemento cuenta con elementos que permiten conocer la orientación espacial a través de los ejes cartesianos para determinar y guardar los ángulos de navegación (pitch, roll, yaw).
- **Módulo GPS:** Se reciben los datos de latitud, longitud, entre otros, de una red de satélites.

- **Módulo de comunicación con la cámara:** Este elemento se enlaza al sistema por medio de un cable de conexión.
- **Módulo de almacenamiento de datos:** Se guarda en una tarjeta SD los datos que se obtienen de los elementos del sistema a partir de una imagen capturada.

## 2.7 Modelo matemático

Un dron de cuatro rotores o cuadricóptero se caracteriza por ser un sistema que posee 6 GDL (tres lineales y tres rotacionales), y cuatro entradas de control, correspondientes a la fuerza de empuje de cada rotor ( $f_1, f_2, f_3, f_4$ ), como se aprecia en la Figura 2.9.



**Figura 2. 9 Posición y elaboración de un cuadricóptero [29].**

Partiendo del comportamiento de la posición y orientación del dron se obtiene el modelo matemático del vehículo (desde la ecuación 2.1 hasta la ecuación 2.8). El procedimiento para obtener dichas expresiones se encuentra detallado en el Anexo A.

$$\dot{X} = \frac{U_1}{m} (\sin\psi \sin\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi) \quad (2.1)$$

$$\dot{Y} = \frac{U_1}{m} (-\cos\psi \sin\phi + \sin\psi \sin\theta \cos\phi) \quad (2.2)$$

$$\ddot{Z} = \frac{U_1}{m} (\cos\theta \cos\phi) - g \quad (2.3)$$

$$\dot{\phi} = p + q \sin\phi \tan\theta + r \cos\phi \tan\theta \quad (2.4)$$

$$\dot{\theta} = q \cos\phi - r \sin\phi \quad (2.5)$$

$$\dot{\psi} = q \sin\phi \sec\theta + r \cos\phi \sec\theta \quad (2.6)$$

$$\dot{p} = \frac{I_{YY} - I_{ZZ}}{I_{XX}} qr - \frac{J_{TP}}{I_{XX}} q\Omega + \frac{lU_2}{I_{XX}} \quad (2.7)$$

$$\dot{q} = \frac{I_{ZZ} - I_{XX}}{I_{YY}} pr + \frac{J_{TP}}{I_{YY}} p\Omega + \frac{lU_3}{I_{YY}} \quad (2.8)$$

$$\dot{r} = \frac{I_{XX} - I_{YY}}{I_{ZZ}} pq + \frac{U_4}{I_{ZZ}} \quad (2.9)$$

Donde  $m$  es la masa del sistema,  $l$  es la distancia entre los motores y el centro de gravedad,  $g$  es la gravedad,  $J_{TP}$  es el momento total inercial respecto al eje del motor y  $\Omega$  es la velocidad angular total, es decir la suma de las velocidades de cada motor con su respectivo signo.

## 2.8 Cálculos

En esta sección se presenta el desarrollo de los cálculos de los parámetros necesarios para el diseño del cuadricóptero, en donde se detallan las potencias de vuelo y el tiempo de trabajo.

### 2.8.1 Potencias del dron

Tomando en cuenta las especificaciones técnicas que se encuentran detalladas en la sección 2.4, la carga muerta es de 4 kg, representando a la estructura y demás componentes del dron. En el caso de la carga útil, se basa en la posibilidad de agregar más elementos, por lo cual es de 0.5 kg.

Además, el cuadricóptero fue diseñado para la costa ecuatoriana, por lo cual se consideró una altitud de aproximadamente 100 m, mientras que, para la toma de datos, 10 m por encima de los cultivos de banano que pueden llegar a medir hasta 7,5 m.

Ante esto, se procedió a realizar el cálculo de la potencia necesaria para que el dron funcione mediante la teoría de cantidad de movimiento (TCM) con un factor de corrección.

Inicialmente, se determinó la altura máxima de vuelo a través de la ecuación 2.10, debido a que la altitud se encuentra relacionada con la potencia de manera directamente proporcional, es decir, a menor densidad de aire, mayor altitud y, por ende, potencia [30].

$$h = \text{altitud} + h_{\text{banano}} + h_{\text{sobrevuelo}} \quad (2.10)$$

$$h = 100 + 7.5 + 10$$

$$h = 117.5 \text{ m}$$

Una vez obtenido el parámetro anterior, con ayuda de la ecuación 2.11 se calculó la densidad de aire por medio del Modelo de atmósfera estándar ISA, en donde  $\rho_0$  es la densidad del aire estándar a nivel del mar y su valor es  $1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - \frac{(6.5 \times 10^{-3}) \cdot h}{288.15} \right)^{5.2559} \quad (2.11)$$

$$\rho = 1.225 \left( 1 - \frac{(6.5 \times 10^{-3}) \cdot (117.5)}{288.15} \right)^{5.2559}$$

$$\rho = 1.208 \frac{kg}{m^3}$$

El empuje requerido por parte de los motores para elevar al cuadricóptero debe ser mínimo la suma de la carga muerta con la útil, la cual es de 4.5 kgf (44.1 N).

Mediante la ecuación 2.12 se obtuvo  $T$ , el cual es el empuje que necesita un solo motor, tomándose en cuenta el peso del cuadricóptero.

$$T = \frac{Carga_{Total}}{4} \quad (2.12)$$

$$T = \frac{4.5}{4}$$

$$T = 1.125 \text{ Kgf}$$

Cada motor debe proveer mínimo 1.125 kgf (11.025 N) para lograr compensar el peso del dron.

Por otro lado, al seleccionar las hélices es importante tomar en cuenta que el tamaño sea el correcto debido a que de esto dependerá que la energía se transfiera de manera adecuada [30].

Considerando los modelos del mercado, se eligió una hélice de 10 pulgadas con un paso de 4.7 pulgadas, elemento que es de fibra de carbono y puede observarse en la Figura 2.10.



**Figura 2. 10 Hélices APC1047 [31].**

Una vez determinado el modelo, se calcularon las condiciones de potencia de la teoría de cantidad de movimiento que se presentan en las secciones posteriores.

### **2.8.1.1 Potencia de vuelo a punto fijo**

Este caso de potencia se basa en que no hay velocidad relativa entre el rotor y el aire, es decir, la velocidad vertical es nula.

A partir de la ecuación 2.13 y la ecuación 2.14 se obtuvo la velocidad inducida del motor en vuelo a punto fijo  $v_{io}$  y el área de proyección de la hélice al girar  $A$ , respectivamente.

$$v_{io} = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (2.13)$$

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2.14)$$

Como resultado, se determinó que  $A = 0.0507 \text{ m}^2$  y que al sustituir el valor en la ecuación 2.13 fue posible conocer que  $v_{io} = 9.49 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Una vez calculadas las variables de interés, se reemplazaron en la ecuación 2.15, la cual permitió conocer la potencia necesaria para este caso.

$$P_{io} = T \cdot v_{io} \quad (2.15)$$

$$P_{io} = (11.025)(9.49)$$

$$P_{io} = 104.63 \text{ W}$$

### 2.8.1.2 Potencia de vuelo axial ascendente

Para este caso, sí existe una velocidad relativa entre el rotor y el aire, por lo tanto, la velocidad vertical es distinta de cero y se añade  $v_c$  a la ecuación de potencia anterior.

Esta velocidad de ascenso se determinó considerando el tamaño y carga dentro del mercado de drones, de modo que se decidió trabajar con  $4 \frac{m}{s}$ .

La teoría de cantidad de movimiento expone que es posible establecer un vínculo entre la velocidad inducida en el motor de vuelo a punto fijo y el de vuelo axial ascendente a partir de la ecuación 2.16.

$$\frac{v_i}{v_{io}} = -\frac{1}{2} \left( \frac{v_c}{v_{io}} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{v_c}{v_{io}} \right)^2 + 1} \quad (2.16)$$

$$\frac{v_i}{9.49} = -\frac{1}{2} \left( \frac{4}{9.49} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{4}{9.49} \right)^2 + 1}$$

$$v_i = 7.70 \frac{m}{s}$$

Una vez determinada la variable de interés, se procedió a calcular la potencia necesaria para este caso mediante la ecuación 2.17.

$$P_i = T \cdot (v_c + v_i) \quad (2.17)$$

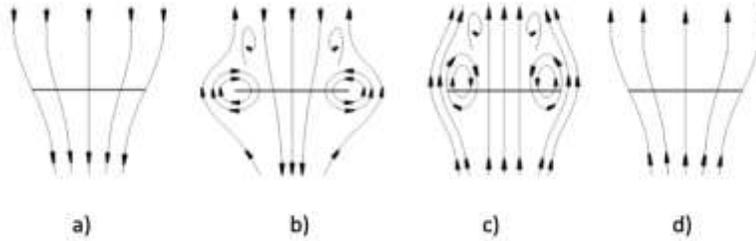
$$P_i = 11.025 (4 + 7.70)$$

$$P_i = 128.97 \text{ W}$$

### 2.8.1.3 Potencia de vuelo axial descendente

En este caso, se presenta un conflicto con la velocidad resultante, la cual puede darse en cualquier sentido. Por lo tanto, se presentan los modos de funcionamiento para este caso:

1. Funcionamiento normal  $\frac{v_c}{v_{io}} \geq 0$
2. Anillos de vórtices  $-1 \leq \frac{v_c}{v_{io}} < 0$
3. Estela turbulenta  $-2 \leq \frac{v_c}{v_{io}} < -1$
4. Molinete frenante  $\frac{v_c}{v_{io}} < -2$



**Figura 2. 11 Regímenes de trabajo de vuelo axial descendente [30].**

La teoría de cantidad de movimiento es aplicable únicamente para el primer y último régimen, los demás son prácticos.

Se asumió una velocidad de descenso  $v_c = -3 \frac{m}{s}$  y se determinó el régimen de funcionamiento mediante la ecuación 2.18.

$$\frac{v_c}{v_{io}} \tag{2.18}$$

$$\frac{v_c}{v_{io}} = \frac{-3}{9.49}$$

$$\frac{v_c}{v_{io}} = -0.32$$

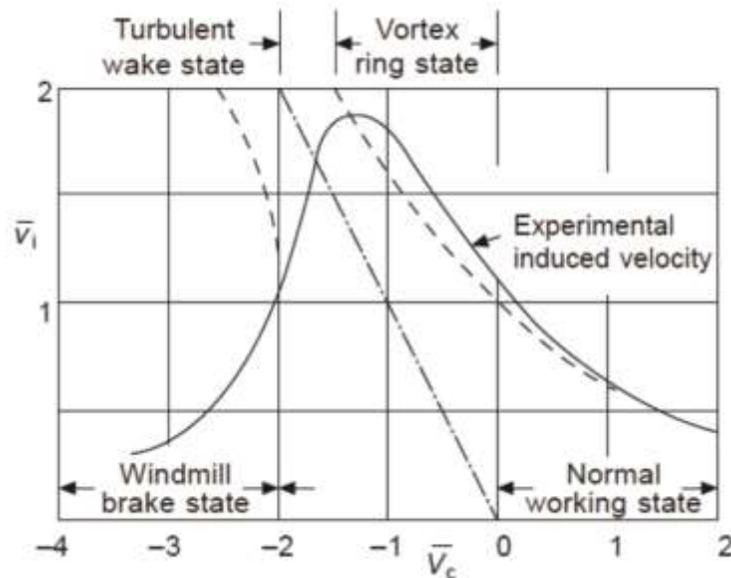
El cálculo indicó que el análisis se encontraba en el segundo régimen de funcionamiento para el cual no es válida la TCM, por lo tanto, se debe realizar un ajuste lineal a través de la ecuación 2.19 para el modo de anillo de vórtices.

$$\frac{v_i}{v_{io}} = k - \frac{v_c}{v_{io}} \quad -1.5 \leq \frac{v_c}{v_{io}} \leq 0 \quad (2.19)$$

En esta expresión, k representa el factor de corrección y su valor es 1.15 para casos reales. Finalmente, se calculó la velocidad inducida para este caso.

$$\frac{v_i}{v_{io}} = 1.15 - (-0.32)$$

$$v_i = 13.91 \frac{m}{s}$$



**Figura 2. 12 Variabilidad de la velocidad inducida en vuelo axial descendente. [30]**

Para determinar la potencia necesaria para este caso se aplicó la ecuación 2.17.

$$P_{id} = 11.025 \cdot (-3 + 13.91)$$

$$P_{id} = 120.32 \text{ W}$$

#### 2.8.1.4 Potencia en vuelo de avance horizontal

Este caso se trata de las velocidades características de funcionamiento, en donde a través de la combinación de la ecuación 2.20 y la ecuación 2.21 se calculó la velocidad de avance, considerando un factor de mérito  $FM = 0.8$  y un ángulo de ataque de la hélice  $\alpha_r = 20^\circ$ .

$$P \cdot FM = 2\rho A v_i \sqrt{(v_a \cos\alpha_r)^2 + (v_a \sin\alpha_r + v_i)^2} (v_a \sin\alpha_r + v_i) \quad (2.20)$$

$$v_i = v_{io} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{4 + \left(\frac{v_a \cos\alpha_r}{v_{io}}\right)^4} - \left(\frac{v_a \cos\alpha_r}{v_{io}}\right)^2 \right]} \quad (2.21)$$

Como resultado se obtuvo que  $v_a = 1.8 \frac{m}{s}$ , lo cual a partir de la ecuación 2.22 permitió conocer la potencia de avance horizontal.

$$P_a = T(v_a \sin\alpha_r + v_i) \quad (2.22)$$

$$P_a = 143.73 \text{ W}$$

#### 2.8.1.5 Potencia del motor

A partir de las potencias anteriormente calculadas, se consideró aquella de mayor valor y el mismo factor de mérito que en la sección 2.8.1.4. para determinar la potencia necesaria por cada uno de los motores a través de la ecuación 2.23.

$$P_{req} = \frac{P_{max}}{FM} \quad (2.23)$$

$$P_{req} = \frac{143.73}{0.8}$$

$$P_{req} = 179.66 \text{ W}$$

Al momento de seleccionar un motor se requiere conocer su potencia, por lo cual se utilizó la ecuación 2.24, en donde se considera un factor de servicio  $f_s = 1.25$ , con el objetivo de evitar que la potencia requerida no exceda su capacidad.

$$P_m = f_s \cdot P_{req} \quad (2.24)$$

$$P_m = (1.25)(179.66)$$

$$P_m = 224.58 \text{ W}$$

### 2.8.2 Tiempo de vuelo

Para determinar el tiempo de vuelo del dron fue necesario conocer la máxima potencia consumida por el motor seleccionado a través de su máximo consumo de corriente y el voltaje nominal suministrado por la batería LiPo, la cual permite que el dron utilice una gran cantidad de energía en un corto tiempo, por lo cual se utilizó la ecuación 2.25.

$$I \cdot V = P \quad (2.25)$$

Según las especificaciones del motor brushless, la máxima corriente continua es de 15 A, mientras que la batería de 4 celdas brinda una tensión nominal de 14.8 V y una capacidad de 9000 mAh.

$$P = (15)(14.8)$$

$$P = 222 \text{ W}$$

Considerando que se utilizan 4 motores, la potencia total consumida fue de 888 W. Por lo tanto, al usarse 3 baterías iguales en paralelo, se obtuvo una capacidad de 27 Ah para el mismo voltaje y mediante de la ecuación 2.26 se calculó el tiempo aproximado de vuelo.

$$T = \frac{E}{P} \quad (2.26)$$

$$T = \frac{27 \text{ Ah} \cdot 14.8 \text{ V}}{888 \text{ W}}$$

$$T = 0.45 \text{ h} = 27 \text{ minutos}$$

Cabe destacar, en este cálculo no se toma en cuenta el consumo del controlador de vuelo, Pixhawk, el cual requiere de 250 mA, es decir, si se lo compara con la capacidad de las baterías, este dispositivo sería capaz de funcionar por aproximadamente 108 horas. Además, el controlador alimenta a un Arduino UNO, el cual consume 46 mA, es decir sería capaz de funcionar aproximadamente por 587 horas. Por lo tanto, comparando ambos escenarios con el consumo del motor, se los puede despreciar, debido que simplemente afectarían en segundos el tiempo de vuelo calculado anteriormente.

## 2.9 Diseño Electrónico

La selección de los componentes utilizados en esta sección para la parte electrónica del cuadricóptero, son descritos a profundidad en el Anexo B. Mientras que, los elementos elegidos para la parte electrónica del sistema de recopilación de información son presentados en el Anexo C.

A continuación, en la Figura 2.13 se presenta la conexión de los elementos seleccionados y en el Anexo D se detalla el peso total de la parte eléctrica, la cual se considera para el diseño mecánico.

### 2.9.1 Selección de controlador de vuelo

El controlador de vuelo es un dispositivo indispensable en el dron, debido que es considerado el cerebro del mismo, y una de sus tareas es la de comandar a los motores. Por esta razón, su selección no es una tarea sencilla, además que existe una gran variedad de marcas en el mercado.

Las alternativas consideradas fueron tres: Pixhawk, Naze32 y Navio2, que son controladores muy conocidos en el mercado. A continuación, en la Tabla 2.3 se muestra la comparación entre estos dispositivos.

**Tabla 2. 3 Comparación entre el controlador Pixhawk, Naze32 y Navio2.**

	<b>Precio (\$)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Fuente abierta</b>	<b>Autonomía</b>	<b>Popularidad</b>
Naze32	30	6	CleanFlight, Betaflight	No	Alta
Pixhawk	120	60	ArduPilot, PX4	Sí	Alta
Navio2	200	80	ArduPilot, PX4	Sí	Media

Por lo tanto, se seleccionó el controlador de vuelo Pixhawk como el más adecuado, ya que el Naze32 no puede ser utilizado en nuestro sistema, debido que no sirve para aplicaciones autónomas, mientras que el Navio2 si bien se lo podría utilizar, el Pixhawk es el más conveniente, dado que es más económico en relación con la funcionalidad que ofrece, posee un peso menor, y es muy popular, por lo que hay una gran variedad de información en internet de cómo utilizarlo.

## 2.9.2 Diagrama de conexiones eléctricas

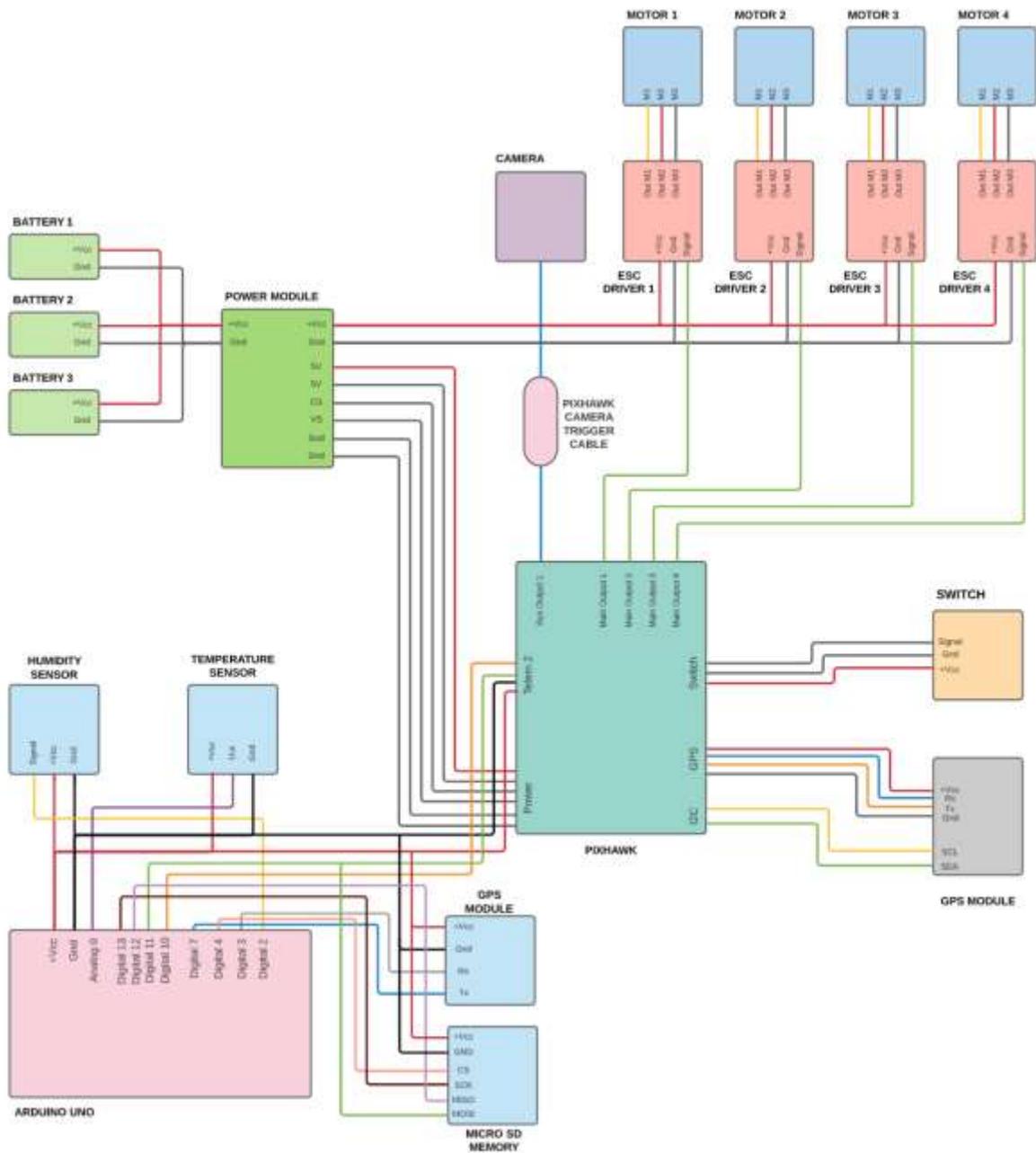


Figura 2. 13 Diagrama eléctrico del proyecto.

## 2.10 Diseño Mecánico

En esta sección se detalla el diseño mecánico del robot agrícola, iniciando con un análisis para la selección de materiales con ayuda del software CES Edupack y luego presentando los diferentes componentes que conformarán la estructura del dron, con sus respectivas mediciones, el material y su peso.

### 2.10.1 Selección de material

Antes de realizar el diseño mecánico del robot aéreo, se debe considerar el material o los materiales que se van a utilizar, debido a que el diseño dependerá de las características de éstos. El análisis realizado para la obtención de los materiales se encuentra detallado en el Anexo E.

De los seis materiales obtenidos con el software CES Edupack se escogieron tres (aluminio 6061, aluminio 7075 y fibra de carbono) para el diseño de las diferentes partes del vehículo aéreo. A continuación, se mencionan algunas de sus propiedades:

**Tabla 2. 4 Especificaciones técnicas para el diseño del dron.**

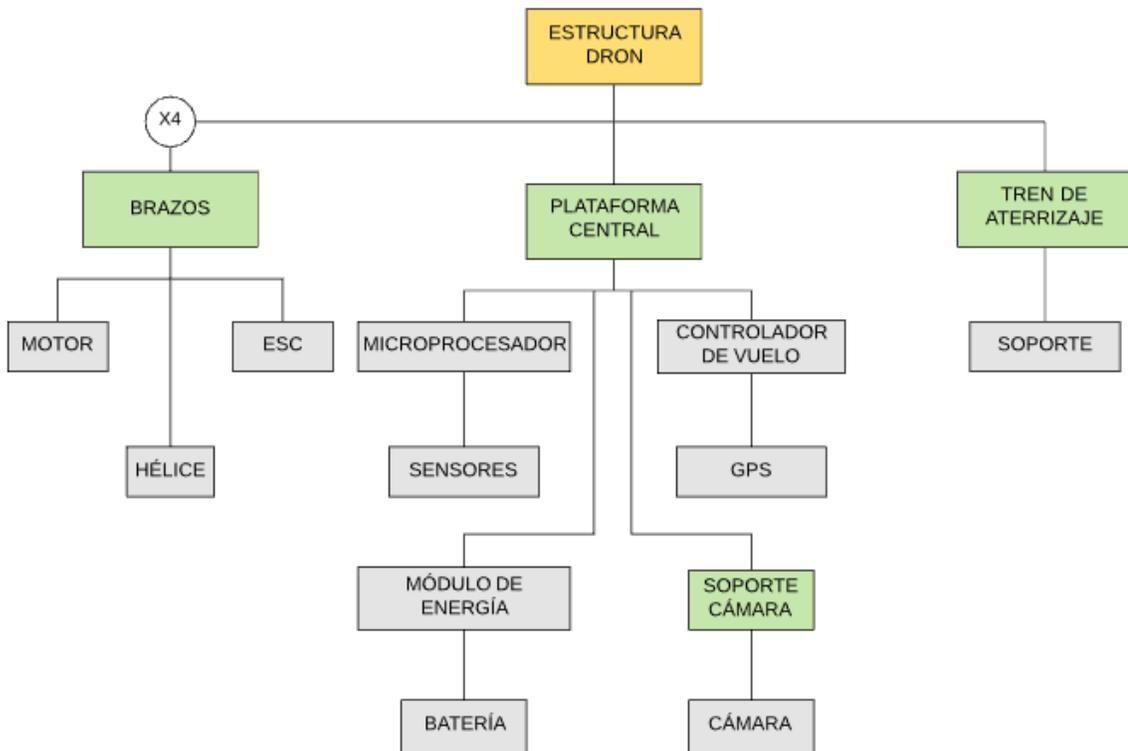
<b>Propiedad</b>	<b>Aluminio 6061</b>	<b>Aluminio 7075</b>	<b>Fibra de Carbono</b>
Densidad	2700	2800	1600
Dureza	30-33	140-160	---
Resistencia última a la tensión	110-152	276	3500
Disponibilidad en el país	Disponible	Disponible	Importado

Como se aprecia, la fibra de carbono posee una mayor resistencia a la tracción en comparación con las dos aleaciones de aluminio, y su densidad disminuye considerablemente, por esta razón se la utilizó para los brazos, además que es un material que posee una mayor resistencia a la fatiga.

Por otro lado, se utilizaron dos aleaciones de aluminio, el 7075 es más resistente en consecuencia se lo utilizó para la base inferior y superior, mientras que el 6061 para el soporte de la cámara y del propio vehículo, debido que no se necesitaba un material muy resistente, además que si se hacía todo de 7075 la masa del dron iba aumentar. Cabe destacar, el aluminio 6061 al poseer una menor resistencia es más fácil de maquinar, adecuado para el diseño de los soportes.

### 2.10.2 Diseño de estructura

En esta sección se muestra un esquema general de todos los componentes que conforman la estructura del dron.



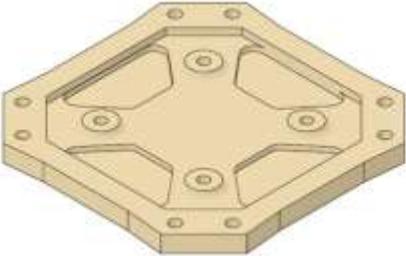
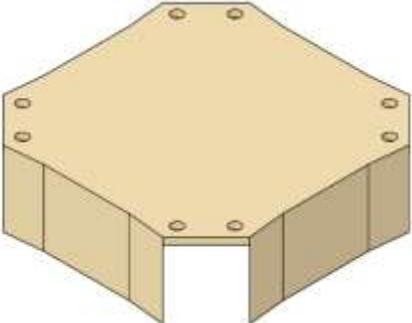
**Figura 2. 14 Diagrama de la estructura mecánica del dron.**

Como se aprecia en la Figura 2.14, el diseño mecánico se lo realizó en cuatro partes: En primer lugar, los brazos, en donde estarán colocados los

motores, también está la plataforma central, en donde se colocará la mayoría de los componentes electrónicos, como el microprocesador, los sensores, la fuente de alimentación, baterías, etc., Por último, están la estructura del tren de aterrizaje, que será el apoyo cuando el dron aterrice a tierra, y el soporte para la cámara multiespectral.

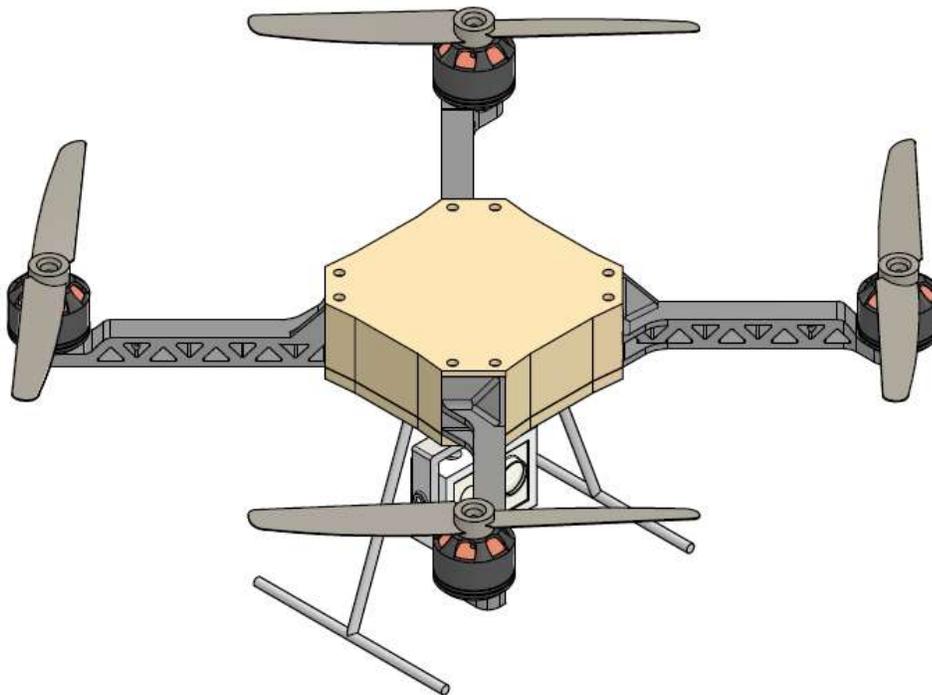
A continuación, se observa cada uno de estos componentes con su respectiva imagen y características:

**Tabla 2. 5 Especificaciones técnicas para el diseño del dron.**

Componente	Imagen	Características
PLATAFORMA CENTRAL		<p><b>Dimensiones:</b> 144.25 x 144.25 x 8 mm</p> <p><b>Material:</b> Aluminio 7075</p> <p><b>Peso:</b> 234 g</p> <p><b>Cantidad:</b> 1 unidad</p>
BASE SUPERIOR		<p><b>Dimensiones:</b> 144.25 x 144.25 x 44 mm</p> <p><b>Material:</b> Aluminio 7075</p> <p><b>Peso:</b> 503 g</p> <p><b>Cantidad:</b> 1 unidad</p>
BRAZO		<p><b>Dimensiones:</b> 187.50 x 36 x 40 mm</p> <p><b>Material:</b> Fibra de carbono</p> <p><b>Peso:</b> 87 g</p> <p><b>Cantidad:</b> 4 unidades</p>

<p>SOPORTE DE LA CÁMARA</p>		<p><b>Dimensiones:</b> 88.25 x 100 x 125 mm</p> <p><b>Material:</b> Aluminio 6061</p> <p><b>Peso:</b> 226 g</p> <p><b>Cantidad:</b> 1 unidad</p>
-----------------------------	---	--

A continuación, en la Figura 2.15 se presenta la estructura del cuadricóptero.



**Figura 2. 15 Estructura mecánica del dron.**

### **2.11 Arquitectura de control**

En esta sección se menciona la arquitectura de control necesaria para que el vehículo aéreo no tripulado sea capaz de moverse en un entorno 3D.

### 2.11.1 Sistema de control

Debido que el robot agrícola viajará en un ambiente 3D, éste requiere ser controlado en dicho espacio, en consecuencia, se debe controlar tanto su posición como su orientación.

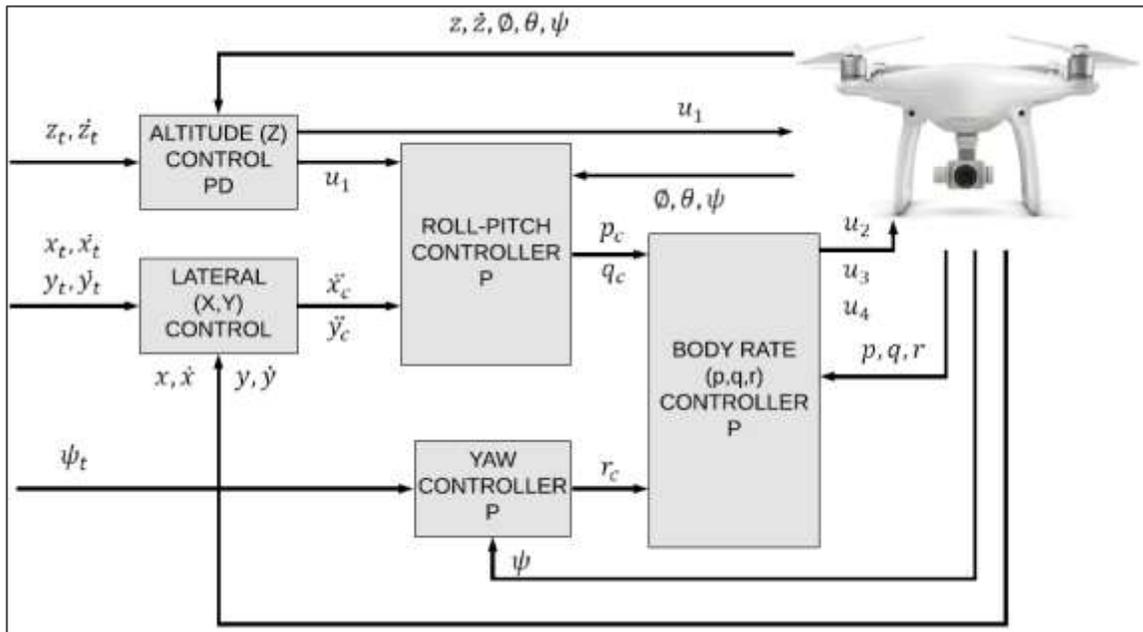


Figura 2. 16 Arquitectura de control de un dron cuadricóptero.

Como se observa en la Figura 2.16, la arquitectura consiste en un controlador de altitud, un controlador de posición (lateral) y un controlador de orientación, éste último se divide en tres controladores pequeños (roll-pitch, yaw y body rate), dado que necesita controlar los ángulos de euler y la velocidad angular respecto al marco de referencia propio del dron. Las ecuaciones de control de dicha arquitectura se encuentran detalladas en el Anexo F.

### 2.11.2 Selección de software de planificación de vuelo

El software de planificación de vuelo es un programa en el cual se insertan distintas variables y comandos que permiten controlar ya sea de manera autónoma o por mando varios tipos de vehículos no tripulados. Al existir una

gran variedad de aplicaciones, se debe buscar aquella que se adecúe a nuestras elecciones y requerimientos.

Por lo cual, las alternativas que se consideraron fueron las siguientes: Mission Planner ArduPilot, CleanFlight y BetaFlight, los cuales son softwares de código abierto, populares en el área de planificación de vuelo. En la Tabla 2.6 se detallan distintas características que permiten realizar un análisis comparativo entre ellos.

**Tabla 2. 6 Comparación entre software ArduPilot, CleanFlight y BetaFlight.**

<b>Software</b>	<b>Fuente abierta</b>	<b>Tipos de vehículos</b>	<b>Compatible con controlador de vuelo seleccionado</b>	<b>Autonomía</b>
Mission Planner ArduPilot	Sí	Multirrotores, aviones de ala fija, land rovers y submarinos	Sí	Sí
CleanFlight	Sí	Cuadricópteros	No	No
BetaFlight	Sí	Cuadricópteros y aviones de ala fija.	No	No

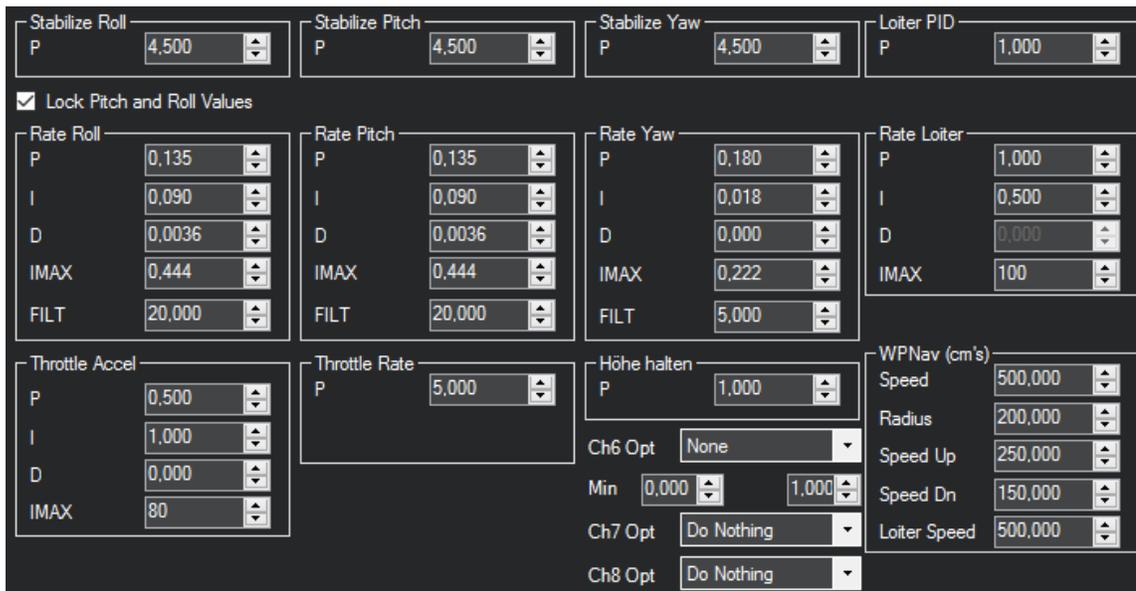
Ante esto, se escogió el software de código abierto Mission Planner ArduPilot como el planificador de vuelo para el sistema, principalmente debido a que es el único compatible con el controlador de vuelo, Pixhawk, seleccionado en la Sección 2.9.1. Y, además, brinda la capacidad de que el dron realice su trabajo de forma autónoma, lo cual es indispensable para nuestro proyecto.

### **2.11.3 Control de vuelo**

En esta sección se describe el control de vuelo en el diseño del cuadricóptero por medio de la conexión entre el controlador de vuelo, Pixhawk, y Mission Planner ArduPilot, el cual es un software de control dinámico para

vehículos no tripulados que cuenta con distintas opciones para pilotos automáticos.

Se tomó en cuenta que es posible que el dron configure cada parámetro para el control a través del modo de vuelo de autoajuste, en el cual el cuadricóptero realiza automáticamente una evaluación PID y reestablece los criterios internos de acuerdo con los algoritmos del sistema.



**Figura 2. 17 Ventana de PIDs del Dron en Mission Planner [32].**

Al existir varios sistemas de control dentro del piloto automático en forma de controladores PID, tal como se detalla en la Figura 2.17, es importante un autoajuste correcto de las ganancias.

En el caso del control roll-pitch, los parámetros Stabilize Roll/Pitch modifican el ángulo requerido en una tasa de rotación necesaria que luego se alimenta al sistema Rate mientras que los de Rate Roll/Pitch transforman la velocidad de rotación necesitada en una salida de motor.

La respuesta obtenida por parte del control del yaw permitirá que se controle la rapidez con la que gira el cuadricóptero, sin necesidad de que ésta requiera de gran afinación.

El parámetro Altitude Hold del control de altitud permite modificar su error en una velocidad de subida o caída requerida y dicha tasa es transformada en una aceleración necesaria, ya sea hacia arriba o abajo. El error de aceleración pasa por el parámetro Throttle Accel, convirtiéndola en una salida del motor.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se encuentra el modelo 3D del robot agrícola, junto con sus dimensiones y análisis de elementos finitos para el brazo y la base, componentes críticos del dron. También, se presentan las configuraciones de la ruta de vuelo y toma de datos, una simulación para la adquisición de información de los sensores utilizando el software Proteus, y el análisis de costos y mercado del proyecto.

### 3.1 Dimensiones del dron

El modelo 3D final del vehículo aéreo no tripulado se presenta en la Figura 3.1, en una vista isométrica con todos los componentes mencionados en la Tabla 2.6.

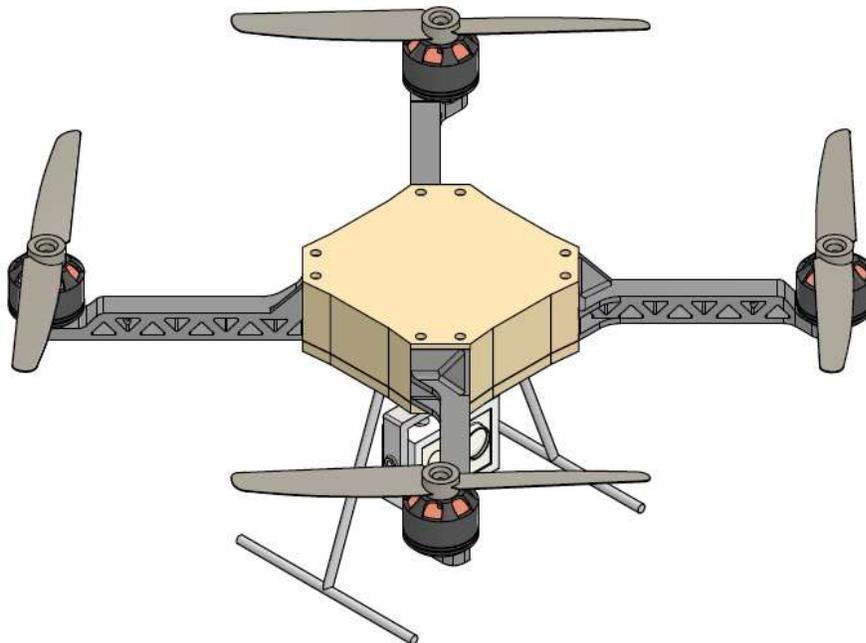
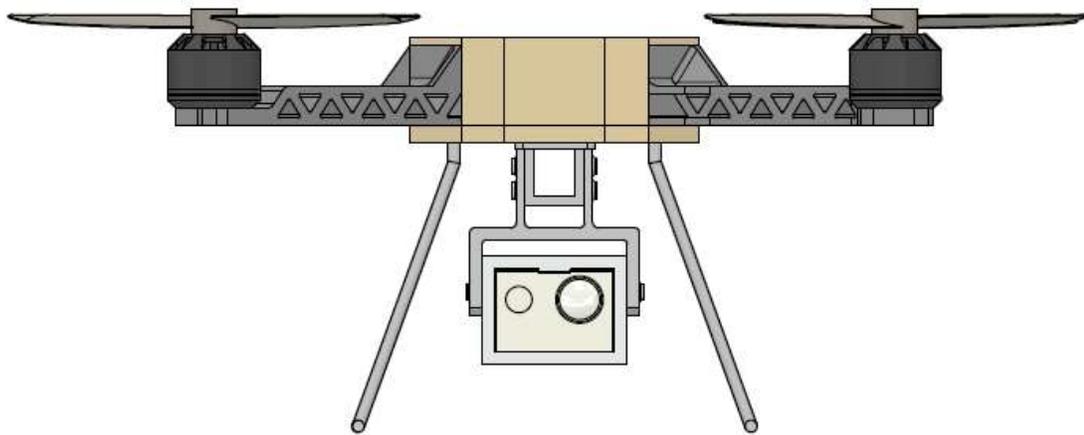


Figura 3. 1 Vista isométrica del vehículo aéreo no tripulado.

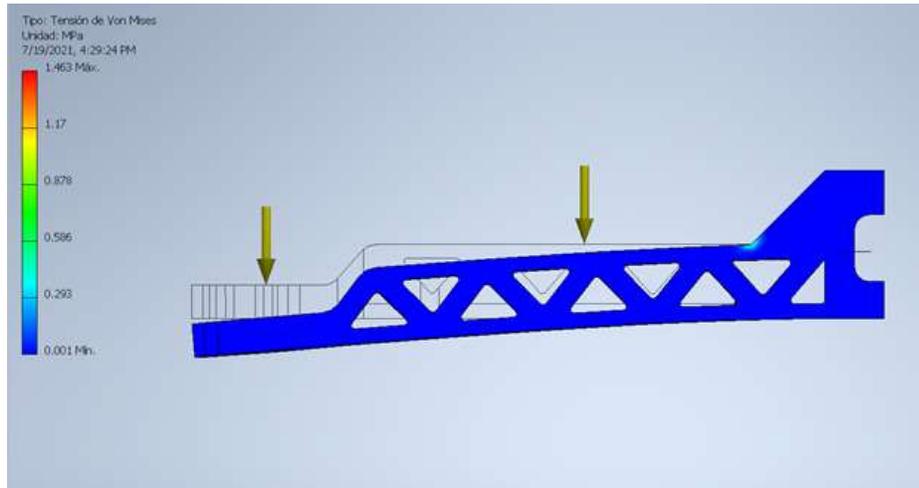
Como se observa en la Figura 3.2, el dron no es plegable. El modelo final posee unas dimensiones de 595 mm de largo y 595 mm de ancho (considerando hélices), y una altura de 211 mm, por lo que, al requerir de poco espacio de almacenamiento, se consideró que no era necesario hacerlo plegable. Además, la estructura posee un peso aproximado de 1.5 kg.



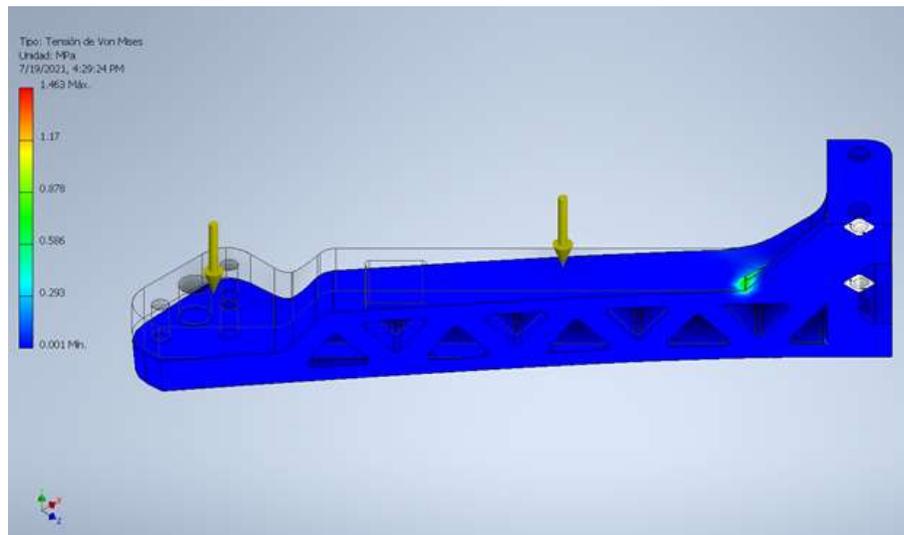
**Figura 3. 2 Vista frontal del vehículo aéreo no tripulado.**

### **3.2 Análisis de elementos finitos**

Para la validación del diseño mecánico se realizó un análisis de elementos finitos a dos de las piezas más críticas del sistema (el brazo y la base) en el software Autodesk Inventor. En la Figura 3.3, 3.4 y 3.5 se observa la simulación realizada del brazo. En este escenario, se colocaron las cargas que soportará (el motor con la hélice, y las baterías), y en consecuencia se obtuvo una tensión máxima de Von Mises de aproximadamente 1.46 MPa. Recordando, que el material del brazo es fibra de carbono, según a la teoría de la máxima energía de distorsión, se puede concluir que el diseño es el adecuado, debido a que el valor obtenido es menor a la tensión del límite elástico del material, lo que significa que las tensiones que esta pieza experimentará no saldrán de su dominio elástico, por lo que no va a fallar.

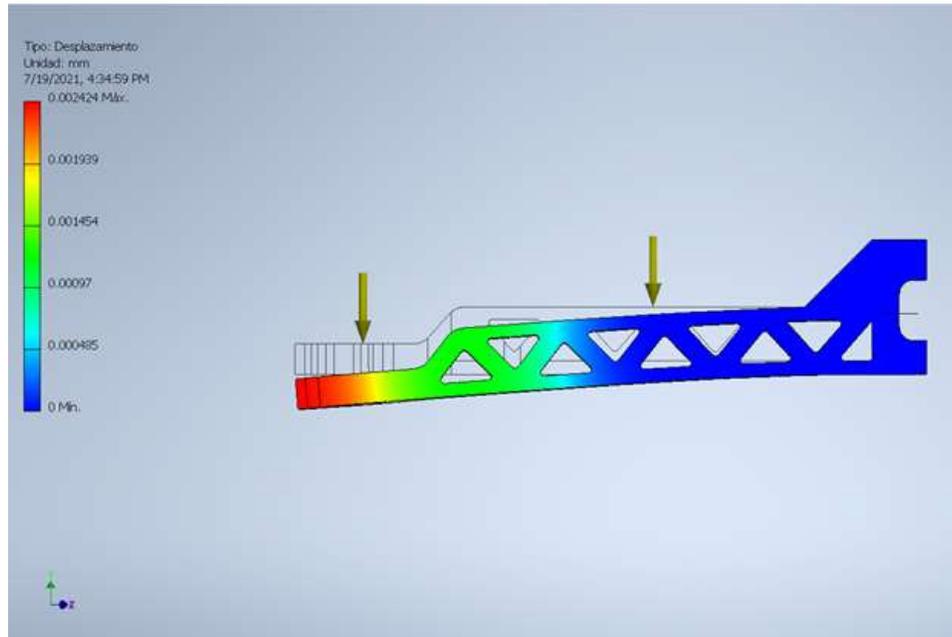


**Figura 3. 3 Análisis de elementos finitos del brazo (Tensión de Von Mises).**



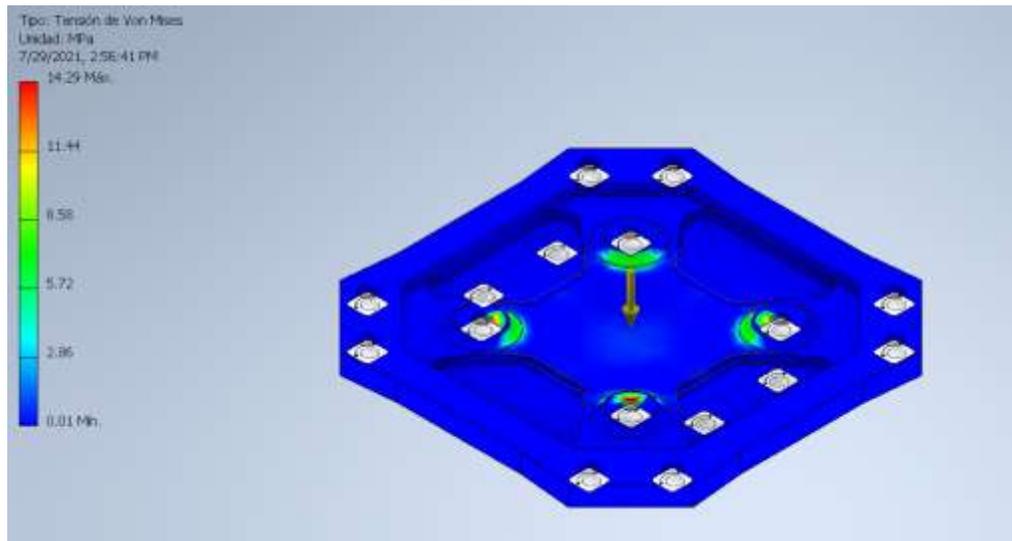
**Figura 3. 4 Análisis de elementos finitos del brazo (Tensión de Von Mises).**

Además, en la Figura 3.5 se aprecia los desplazamientos que experimenta el brazo debido a las cargas. Como era de esperarse, al no sufrir compresión la pieza no posee desplazamientos negativos, pero si positivos a causa de las tensiones. Una gran ventaja de este diseño es que el desplazamiento máximo es aproximadamente 0.0024 mm, lo que significa que sufre deformaciones muy pequeñas, muy adecuado, debido a que el brazo debe permanecer lo más estático posible para no afectar el vuelo del dron.



**Figura 3. 5 Análisis de elementos finitos del brazo (Desplazamiento).**

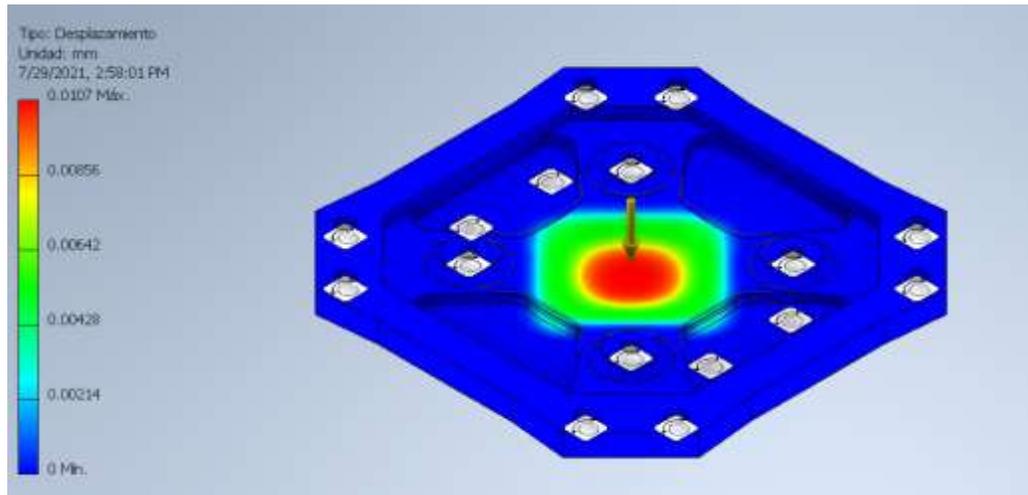
Finalmente, se analizó la estructura de la base. Como se aprecia en la Figura 3.6, la tensión de Von Mises máxima es de 14.29 MPa, y al no superar la tensión elástica del material, se concluye que el diseño es adecuado.



**Figura 3. 6 Análisis de elementos finitos de la base (Tensión de Von Mises).**

Asimismo, se obtuvo el desplazamiento que sufre la base del vehículo (Figura 3.7), obteniendo un desplazamiento máximo de 0.0107 mm, un valor

mayor al desplazamiento del brazo, algo que era de esperarse, ya que la base sufre mayores esfuerzos, sin embargo, es un desplazamiento despreciable, que no alterará el funcionamiento del dron.

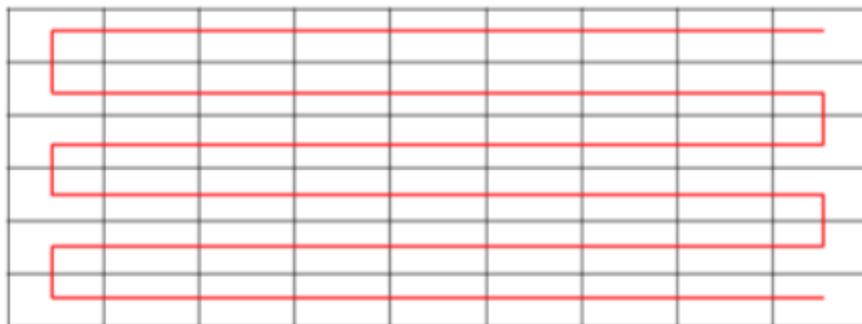


**Figura 3. 7 Análisis de elementos finitos de la base (Desplazamiento).**

### **3.3 Configuración de ruta de vuelo**

En la configuración de los puntos para la ruta de vuelo se utilizó el software de código abierto Mission Planner ArduPilot, el cual se encuentra enlazado al controlador de vuelo.

Para la forma de vuelo, se seleccionó el patrón de movimiento back and forth, en donde el dron realiza una trayectoria en forma de zigzag, tomando en cuenta que no existen bloqueos.



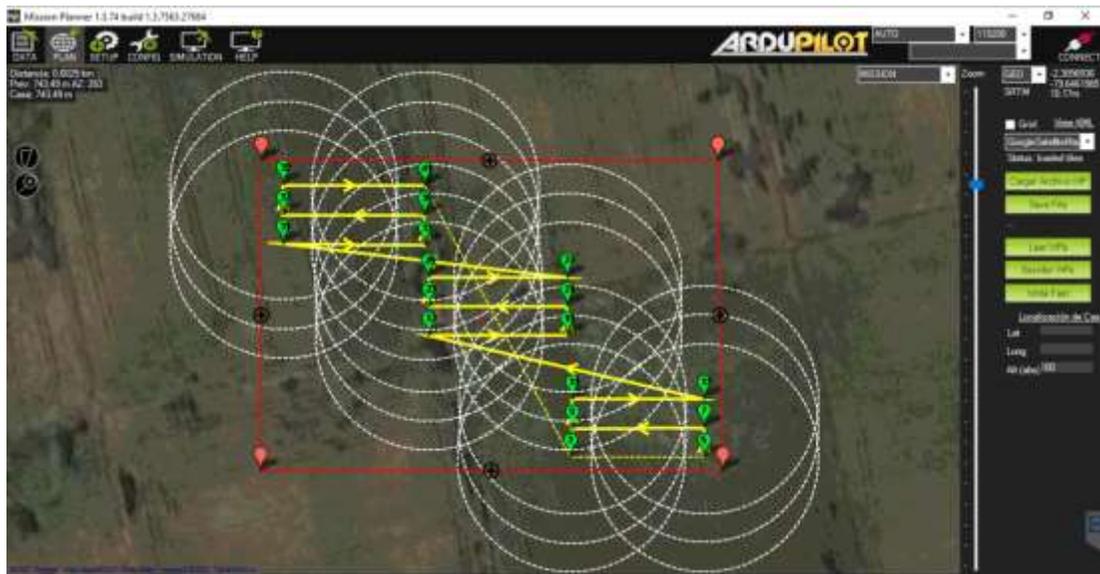
**Figura 3. 8 Patrón de movimiento Back and forth.**

Este proceso de planificación tuvo como objetivo establecer una secuencia de puntos que sean capaz de abarcar un lote de 4 hectáreas con 3 muestras cada una. En la Figura 3.9, inicialmente se definió el área de trabajo para una muestra de aproximadamente 1000 m<sup>2</sup> con un tiempo de 1 minuto con 27 segundos.



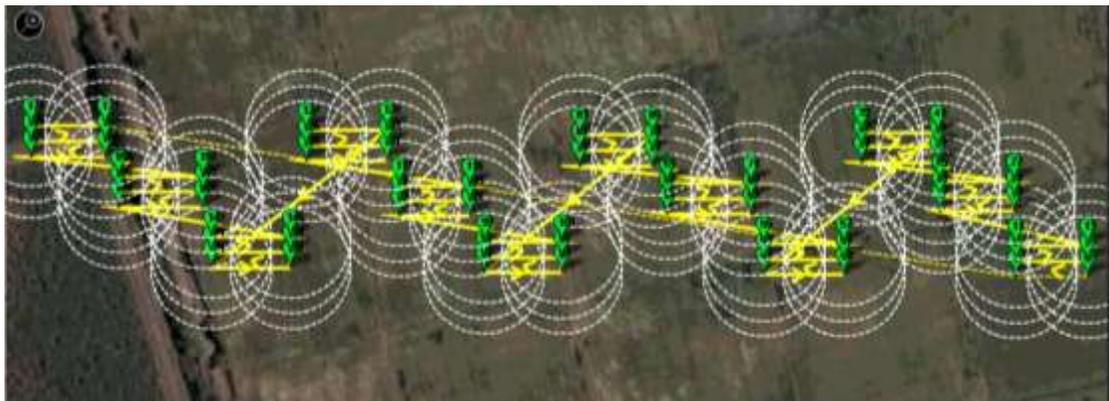
**Figura 3. 9 Área de trabajo en una muestra.**

Los puntos dispuestos por el software para la ruta de vuelo fueron determinados mediante distintos parámetros como altura constante de 20 m, una velocidad entre puntos de ruta de 5 m/s y un delay de 1.5 segundos por cada variación de dirección o giro, tal como se observa en la Figura 3.10, en donde se observan las 3 muestras por hectárea con un tiempo de 4 minutos con 43 segundos.



**Figura 3. 10 Puntos determinados para una hectárea.**

En la Figura 3.11 se muestra la planificación de vuelo de un lote, en donde, el dron es capaz de efectuarla al establecer los puntos, el patrón de movimiento, distintos comandos y parámetros. Como resultado, se obtiene que el tiempo estimado de vuelo es de 24 minutos con 38 segundos.



**Figura 3. 11 Plan de vuelo del dron en un lote.**

En el Anexo G se exponen 2 planificaciones de vuelo extra, con el objetivo de lograr obtener la mayor cantidad de información sobre la enfermedad en caso de que el usuario desee datos en otros puntos de las hectáreas.

Además, en el Anexo H se presentan los comandos generados por el software para el dron en cada punto de vuelo para una hectárea, en donde, se le indica qué debe hacer con ayuda de otros parámetros como el tiempo y la distancia. Además, se detalla el comando “DO\_SET\_CAM\_TRIGG\_DIST”, el cual permite activar el obturador de la cámara en los puntos de referencia para que sea capaz de generar capturas en intervalos regulares.

### 3.4 Proceso de fotogrametría

Para esta sección se tomó en cuenta que el parámetro de altura del dron no cambia durante su vuelo, al igual que su velocidad entre puntos de ruta, tal como se describe en la Sección 3.3.

La cámara utilizada en este procedimiento es la elegida en la Sección 2.1.2, la cual cuenta con un campo visual horizontal de 63.9, vertical de 50.1 y diagonal de 73.5 para la RGB, mientras que el campo de visión horizontal, vertical y diagonal de las de monobanda es de 70.6, 52.6 y 89.6, respectivamente. La altura de trabajo del dron le permite abarcar un área de la región de  $C_1 * C_2$ , como se observa en la Figura 3.12.

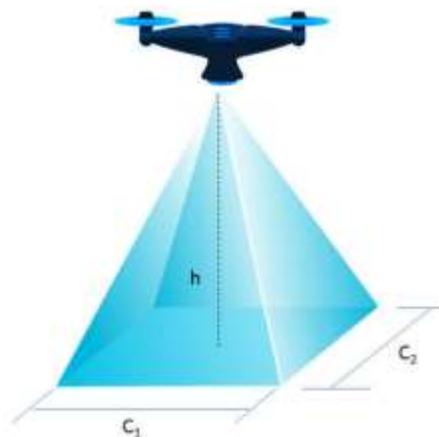
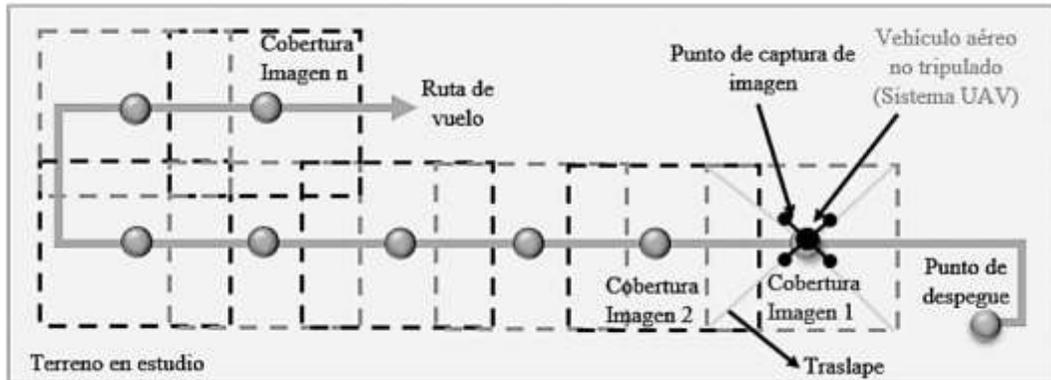


Figura 3. 12 Campo de visión de la cámara [33].

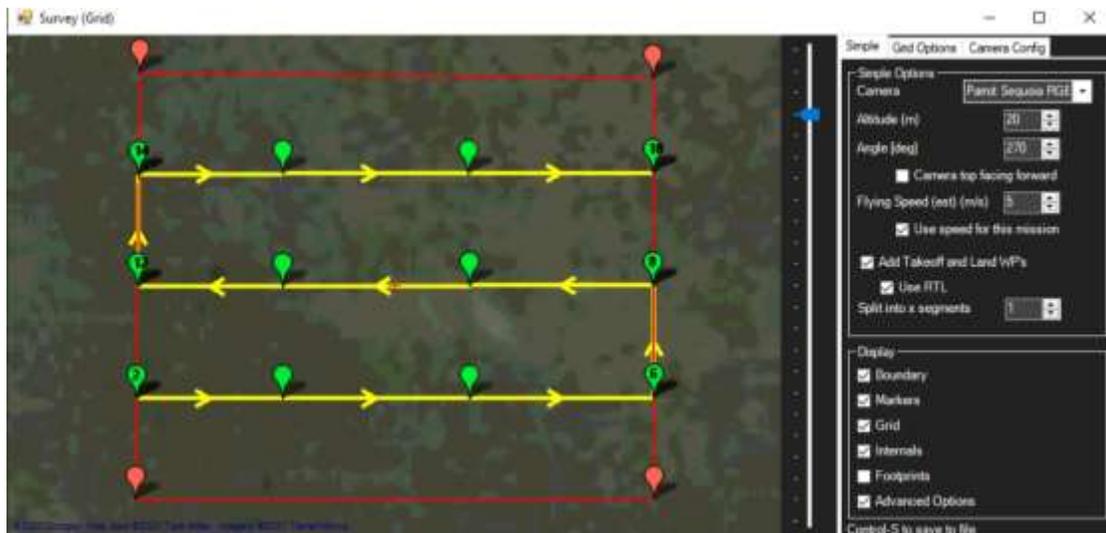
La captura de imágenes se realizó a través de la ruta de vuelo con puntos de levantamiento de datos a cierta distancia con un porcentaje de traslape, como

se observa en la Figura 3.13, logrando que se obtenga una información completa.



**Figura 3. 13 Levantamiento fotogramétrico con dron de 4 rotores [34].**

En la Figura 3.14 se presenta el plan de vuelo generado en el software Mission Planner ArduPilot, en donde se puede observar los posibles intervalos de trabajo para la captura de imágenes para un área aproximada de 1000 m<sup>2</sup>.



**Figura 3. 14 Plan de vuelo dividido en intervalos.**

### 3.5 Simulación de adquisición de información

A continuación, se presenta el diagrama eléctrico del proyecto con cada uno de los componentes utilizados en la toma de datos climáticos, simulado en

el software Proteus, en donde se detalla el Arduino UNO, sensor de temperatura LM35, sensor de humedad DHT11, módulo GPS y la tarjeta Micro SD.

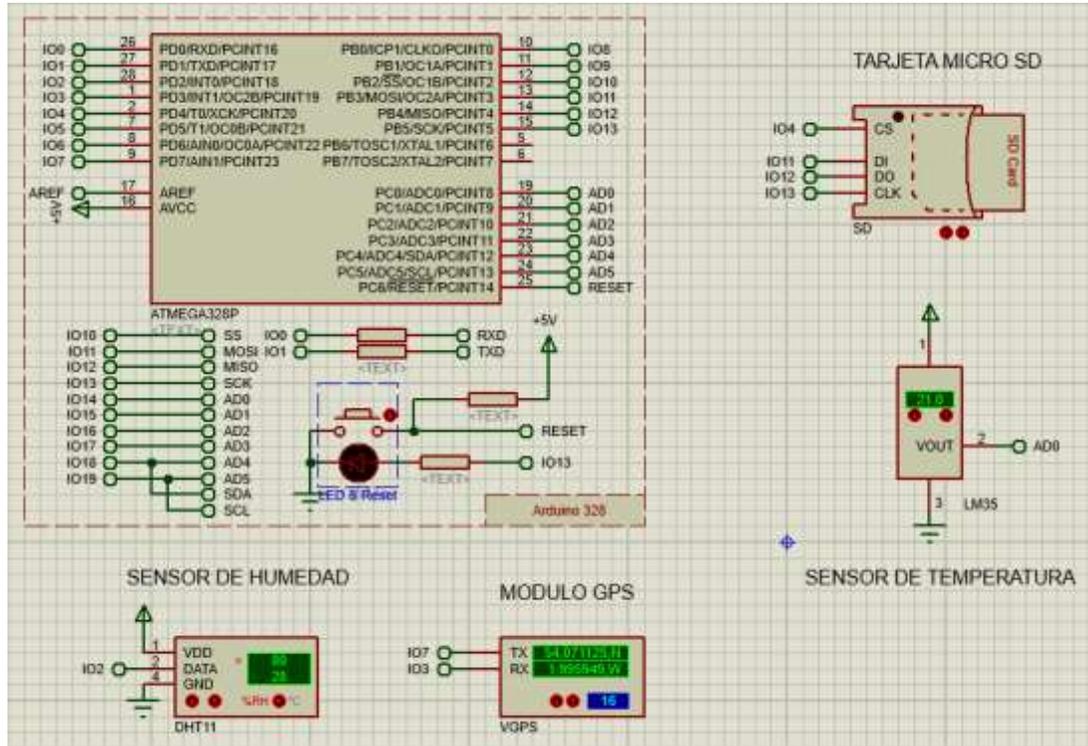


Figura 3. 15 Componentes para simulación en Proteus.

Con el fin de obtener la información se escribió un código .ino, el cual se encuentra en el Anexo I, para cargarlo en el microprocesador y generar la simulación que se muestra en la Figura 3.16.



### 3.6 Análisis de costos

El costo total de este proyecto se presenta en la Tabla 3.1, en donde se detallan los costos de los materiales y equipos utilizados tanto en el sistema eléctrico como en el mecánico.

**Tabla 3. 1 Presupuesto para la construcción del cuadricóptero.**

ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO
<b>SISTEMA ELÉCTRICO</b>			
Arduino UNO	1	\$30.00	\$30.00
PIXHAWK	1	\$44.70	\$44.70
HP SimonK 30A ESC	4	\$17.05	\$68.20
Motor Sunny Sky X2212-13	4	\$10.00	\$40.00
Batería LiPo 9000mAh	3	\$96.00	\$288.00
Cámara Parrot Sequoia	1	\$3500.00	\$3500.00
Pixhawk Trigger Cable	1	\$20.00	\$20.00
Módulo GPS	1	\$20.00	\$20.00
Sensor de temperatura	1	\$2.00	\$2.00
Sensor de humedad	1	\$6.00	\$6.00
Módulo GPS	1	\$10.00	\$10.00
Módulo de Tarjeta Micro SD	1	\$2.00	\$2.00
Otros	-	-	\$20.00
		<b>Subtotal</b>	\$4050.90
<b>SISTEMA MECÁNICO</b>			
Hélices APC1047	4	\$1.40	\$6.60
Aluminio 7075	1	\$20.00	\$20.00
Aluminio 6061	1	\$10.00	\$10.00
Fibra de carbono	1	\$40.00	\$40.00
Elementos de sujeción	60	\$0.50	\$30.00
Otros	-	-	\$40.00
		<b>Subtotal</b>	\$146.60
<b>GASTOS VARIOS</b>			

Honorarios	2	\$375.00	\$750.00
Mano de obra	1	\$1000.00	\$1000.00
		<b>Subtotal</b>	\$1750.00
<b>TOTAL</b>			\$5947.50

El costo de la parte eléctrica del proyecto fue la más elevada debido a la cámara seleccionada. Por otro lado, en la parte mecánica, se consideró el precio del material por unidad de masa, tomando en cuenta que se utilizó dos aleaciones de aluminio (Aluminio 7075 y 6061) y fibra de carbono, así como los elementos de sujeción necesarios. Finalmente, se consideró gastos extras, como transporte, y variaciones en el precio de los materiales en el mercado.

Asimismo, se tomó en cuenta el costo de la mano de obra prestada para el desarrollo del equipo y el costo del trabajo de los diseñadores a partir del sueldo de un Ingeniero Mecatrónico recién graduado en el país, el cual es de \$1500 al mes. Cabe destacar, para el armado y pruebas de funcionamiento del sistema, solo se requerirá de un tiempo de trabajo de 1 semana [35].

El costo total del proyecto es elevado, pero se debe considerar que son elementos necesarios y de gran beneficio para el cliente, permitiéndole adquirir información sobre los cultivos y variables climáticas, con las cuales, posteriormente, será capaz de determinar la presencia de la plaga.

### 3.6.1 Análisis de mercado

Al realizar una investigación en el mercado nacional, se determinó que a pesar de que se ofertan drones que capturan imágenes, ninguno es para el área de la agricultura. Por lo cual, se llevó a cabo un análisis con respecto al mercado internacional, en donde, se tomaron en cuenta 3 modelos de drones: SenseFly eBee X [36], DJI P4 Multispectral Drone [37] y Matrice 300 RTK [38], los cuales cuentan con funciones parecidas, las cuales se detallan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3. 2 Comparación de modelos de drones agrícolas en mercado internacional.**

<b>Robot Aéreo</b>	<b>Tipo de Drone</b>	<b>Cámara</b>	<b>Autonomía</b>	<b>Tiempo de vuelo</b>	<b>Precio</b>
SenseFly eBee X	Ala fija	MicaSense RedEdge-MX	Control Remoto	59 min	\$19.800
DJI P4 Multispectral Drone	4 rotores	RGB y multispectral cámara	Control Remoto	27 min	\$9.100
Matrice 300 RTK	6 rotores	Zenmuse P1	Control Remoto	55 min	\$13.200

Realizando una comparación entre los modelos anteriormente descritos con el dron del presente proyecto, se puede concluir que a pesar de que algunos de ellos cuentan con mayor tiempo de vuelo, el nuestro está enfocado en específico para cumplir con las necesidades del cliente. Además, al no venderse en el país deben ser importados, lo cual implica un costo extra.

Otra diferencia es que todos deben ser comandados mediante un control remoto, mientras que, con nuestro diseño, se plantea que el cuadricóptero realice una ruta de vuelo de manera autónoma, efectuando la adquisición de información.

Por lo tanto, nuestra solución es eficiente para el cumplimiento de los requerimientos del cliente, con un precio por debajo de los modelos del mercado internacional, sin tomar en cuenta el valor agregado de importación e impuestos, ofreciendo características personalizadas en la toma de datos.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

El robot agrícola propuesto cumple con el objetivo de crear un sistema que permita recopilar información de la enfermedad Sigatoka negra en las plantaciones de banano, a través del uso de una cámara multispectral y sensores climáticos que podrán ser visualizados en una computadora, para un futuro procesamiento, beneficiando a la industria bananera, al aumentar la producción sin necesidad de incrementar recursos, y minimizando el impacto ambiental producido por los pesticidas.

El sistema seleccionado para el presente proyecto fue de tipo aéreo debido que las condiciones de suelo no eran favorables para implementar uno terrestre, además que el tamaño del sistema iba aumentar de forma considerable, con un diseño más complejo. Por esta razón, como solución final se escogió un cuadricóptero, dado que la aplicación no requiere de un sistema que soporte grandes cargas, a diferencia de un hexacóptero, el cual se había planteado inicialmente, que, si bien ofrecía la ventaja de tener una mayor capacidad de carga, esto conllevaría a necesitar más componentes electrónicos y mecánicos, aumentando costos de producción.

Para el diseño mecánico de la base superior e inferior se eligió aluminio 7075 dado que posee una mayor resistencia, mientras que, para los soportes de la cámara y el tren de aterrizaje, aluminio 6061. Si bien este último material posee una menor resistencia, es adecuado por su facilidad de maquinarse y su menor densidad, a diferencia de si todo el vehículo fuera de un mismo material, debido a que su peso aumentaría de forma considerable, afectando su autonomía. Por lo tanto, el peso total del dron es de aproximadamente 4.5 kg, en donde, la carga muerta es de 4 kg y la carga útil de 0.5 kg, siendo la primera, el

peso de la estructura más los componentes electrónicos y la segunda, un extra en caso de que se desee agregar más elementos.

Se realizó el diseño de la estructura en el software Autodesk Inventor Professional 2021, obteniendo que el robot agrícola posee dimensiones de 595 mm de largo, 595 mm de ancho y una altura de 211 mm, es decir, no requiere de un gran espacio de almacenamiento. Además, en ese mismo programa se simuló un análisis de elementos finitos, validando que el dron es capaz de soportar las cargas que experimentará, en conjunto con los materiales seleccionados, logrando un sistema ligero y al mismo tiempo resistente.

El diseño electrónico se dividió en la selección de los elementos del dron y los del sistema de adquisición de datos, en donde, para el primero se eligió un Arduino UNO como microprocesador y el Pixhawk como controlador de vuelo, mientras que, para el otro, se escogió una cámara multiespectral, debido a que posee una mayor capacidad de bandas espectrales, por lo que es capaz de captar información que el ojo humano no puede ver, haciéndolo útil para conocer la salud y el bienestar de la plantación. Además, para este mismo sistema, se escogieron sensores de humedad y temperatura, dado que la enfermedad Sigatoka Negra prolifera más en temperaturas entre 23-28 °C, con humedades relativas mayores al 80%.

El plan de vuelo definido se basa en que el VANT sea capaz de abarcar un lote de 4 hectáreas con 3 muestras cada una, con el fin de recolectar suficiente información dentro del tiempo de 27 minutos que proporcionan las 3 baterías de 9000 mAh seleccionadas. Para validar que el tiempo de trabajo del dron sea menor que el calculado, se realizó una simulación de la planificación de vuelo en el software Mission Planner ArduPilot, dando como resultado 24 minutos con 38 segundos, lo cual implica que tendrá tiempo extra en caso de que ocurra algún tipo de delay o situación no planificada.

El controlador de vuelo Pixhawk en conjunto con el software Mission Planner ArduPilot permiten introducir parámetros, rutas y seleccionar distintos modos de vuelos, así mismo, es capaz de seleccionar por sí mismo, las diferentes ganancias y valores requeridos para llevar a cabo el sistema de control, utilizándose esta función dentro del proyecto, otorgándole la capacidad de autonomía.

El costo final del cuadricóptero es de 5947.50 dólares, a pesar de esto, el valor se encuentra por debajo de los drones comerciales que se ofertan en el mercado internacional sin tomar en cuenta el valor agregado de importación e impuestos, ofreciendo características personalizadas en la toma de datos.

## **4.2 Recomendaciones**

Para que el robot agrícola trabaje correctamente y no presente fallos, se debe evitar su operación bajo las siguientes condiciones climáticas: lluvias o fuertes vientos. Además, para prevenir descensos bruscos, no se debe superar la carga nominal del cuadricóptero (4.50 kg), lo cual, también podría afectar la autonomía del sistema, así como el tiempo de vida de sus componentes.

Si se desea que el sistema funcione en ambientes con lluvias ligeras, se recomienda buscar un motor que se acople a las especificaciones de diseño y que cumpla con la norma IP65, la cual representa protección ante el ingreso de chorros de agua de baja presión desde cualquier ángulo en equipos electrónicos.

En caso de que se desee reducir el peso del sistema, lo más aconsejable sería implementar fibras de carbono como material en toda su estructura, no obstante, se debe considerar que este cambio va a aumentar de forma considerable el costo de producción. Por otro lado, si se necesita disminuir el costo del proyecto, se recomienda cambiar la cámara del sistema de recopilación de información por una de menor precio, sin embargo, es importante

tener en cuenta que, las imágenes no serán de la misma resolución o calidad y no ofrecerán la misma información que la actual.

Para el desarrollo de este proyecto, se debe tomar en cuenta que se necesita de un cargador para las baterías de LiPo, el cual tiene un costo que oscila entre 100 a 200 dólares.

Para futuros trabajos se recomienda tomar en cuenta la información obtenida a través de la cámara y sensores, con el fin de analizarla y detectar la enfermedad de la Sigatoka Negra de forma temprana.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de comercio exterior, «Informe sector bananero ecuatoriano,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/Informe-sector-bananero-español-04dic17.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [2] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, «Banano, plátano y otras musáceas,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.iniap.gob.ec/pruebav3/banano-platano-y-otras-musaceas/>. [Último acceso: 2021].
- [3] ADAMA Ecuador, «Golpe de control contra la Sigatoka Negra en tu cultivo de banano,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.adama.com/ecuador/es/actualidad-adama/golpe-de-control#:~:text=La%20Sigatoka%20Negra%2C%20causada%20por,de%20banano%20en%20el%20Ecuador.&text=Es%20indispensable%20mantener%20el%20follaje,en%20el%20rendimiento%20del%20cultivo>. [Último acceso: 2021].
- [4] Grupo Bancolombia, «Robótica + agricultura: innovación en los campos,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/innovacion/tecnologias-disruptivas/robotica-agricultura-innovacion-en-colombia>. [Último acceso: 2021].
- [5] Escuela Superior Politécnica del Litoral, «CIDIS capacita sobre Agricultura 4.0,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.espol.edu.ec/es/noticias/cidis-capacita-sobre-agricultura-40>. [Último acceso: 2021].
- [6] ADAMA Ecuador, «Golpe de control contra la Sigatoka Negra en tu cultivo de banano,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.adama.com/ecuador/es/actualidad-adama/golpe-de-control>. [Último acceso: 2021].

- [7] B. Capa, T. Alaña y R. Benitez, «IMPORTANCIA DE LA PRODUCCIÓN DE BANANO ORGÁNICO. CASO: PROVINCIA EL ORO, ECUADOR,» *Revista Universidad y Sociedad*, 2016.
- [8] C. Barrera y J. Vallejo, «PLAN DE NEGOCIOS: SERVICIO DE FUMIGACIÓN CON DRONES PARA PLANTACIONES BANANERAS EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/130121/D-P13860.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [9] J. P. Vega, «LOS AGROQUÍMICOS SON UN MERCADO QUE MUEVE CERCA DE US\$600 MILLONES AL AÑO,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.agronegocios.co/agricultura/los-agroquimicos-son-un-mercado-que-mueve-cerca-de-600-millones-al-ano-2723848>. [Último acceso: 2021].
- [10] Ministerio de Agricultura, «Agricultura, la base de la economía y la alimentación,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.agricultura.gob.ec/agricultura-la-base-de-la-economia-y-la-alimentacion/>. [Último acceso: 2021].
- [11] Universidad Técnica de Ambato, «Sector Bananero Ecuatoriano,» 2018. [En línea]. Available: <https://blogs.cedia.org.ec/obest/wp-content/uploads/sites/7/2020/08/Sector-bananero-ecuatoriano-final.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [12] Ministerio de Comercio Exterior, «Informe Sector Bananero Ecuatoriano,» Quito, 2017.
- [13] Clúster banano, «Afecciones y enfermedades del banano,» 2018. [En línea]. Available: <https://banano.ebizar.com/afecciones-y-enfermedades-del-banano/>. [Último acceso: 2021].
- [14] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, «Manejo fitosanitario del cultivo del plátano,» Bogotá, 2021.
- [15] Gobierno de Pereira, « CERO BROTES DE MOKO EN EL PLÁTANO,» 2017. [En línea]. Available:

<http://www.pereira.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/CERO-BROTOS-DE-MOKO-EN-EL-PLÁTANO.aspx>. [Último acceso: 2021].

- [16] L. B. López, «CUANTIFICACIÓN TEMPRANA DE *Pseudocercospora fijiensis* POR MEDIO DE qPCR EN MODELOS PREDICTIVOS DE SIGATOKA NEGRA EN PLANTAS DE BANANO (*Musa AAA*),» 2019.
- [17] G. Cedeño, C. Suarez, D. Vera, C. Fadda, D. Jarvis y P. De Santis, «Detección temprana de resistencia a *Mycosphaerella fijiensis* en genotipos locales de Musáceas en Ecuador,» *Revista Scientia Agropecuaria*, 2017.
- [18] El comercio, «Las plagas afectaron al banano en Ecuador en estos 71 años, la más grave fue el *Fusarium* 1,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/plagas-banano-ecuador-fusarium-bonanza.html>. [Último acceso: 2021].
- [19] K. K. Z. Velásquez, «“DESARROLLO DE UN PLAN DE MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS Y ENFERMEDADES EN EL CULTIVO DE PLÁTANO (*Musa sp*) DIRIGIDO A LA COMUNIDAD DEL CANTÓN LA MANÁ, PROVINCIA DE COTOPAXI.”,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/1924/1/T-UTEQ-0037.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [20] SENASA , «MINAGRI instruye a pequeños plataneros del Vraem en Escuela de Campo,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.senasa.gob.pe/senasacontigo/senasa-minagri-instruye-pequenos-plataneros-del-vraem-en-escuela-de-campo/>. [Último acceso: 2021].
- [21] SciDev, «App identifica enfermedades del banano,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.scidev.net/america-latina/news/app-identifica-enfermedades-del-banano/>. [Último acceso: 2021].
- [22] L. G. Pérez, «NAVEGACIÓN AUTÓNOMA DE ROBOTS EN AGRICULTURA: UN MODELO DE AGENTES,» Madrid, 2003.
- [23] C. Esperbent, «Robots: la próxima revolución del campo,» *Revista de*

*Investigaciones Agropecuarias*, p. 7, 2016.

- [24] Revista de Robots, «¿Qué es un robot agrícola? Ejemplos de la ingeniería robótica agrícola 4.0,» 2021. [En línea]. Available: <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/ingenieria-robotica-agricola-4-0/>. [Último acceso: 2021].
- [25] J. García, N. Farías, R. Benavides-J y E. Escobar, «Procesamiento de imágenes aplicadas a la identificación de agentes patógenos en el cultivo de plátano,» *Revista de Tecnologías de la Información*, p. 9, 2017.
- [26] The University of Sydney , «Rippa robot takes farms forward to the future,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2015/10/21/rippa-robot-takes-farms-forward-to-the-future-.html>. [Último acceso: 2021].
- [27] K. R. Krishna, *Agricultural Drones*, 2018.
- [28] P. Ruipérez, «DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DRON,» [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73170/RUIPÉREZ%20-%20Diseño%20y%20fabricación%20de%20un%20dron%20mediante%20impresión%203D.pdf?sequence=5>. [Último acceso: 2021].
- [29] E. Paiva-Peredo, «MODELADO Y CONTROL DE UN CUADRICÓPTERO,» 2016. [En línea]. Available: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2514/MAS\\_IME\\_AUT\\_002.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2514/MAS_IME_AUT_002.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 2021].
- [30] P. Davila, J. Orna, A. Rosales y E. Avalos, «Diseño, construcción de la estructura mecánica y pruebas de vuelo de un hexacóptero de monitoreo para aplicaciones militares,» 2007. [En línea]. Available: <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen39/tomo1/648.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [31] Amazon, «HONGYI Hélice de fibra de carbono 1 par 10 x 4,7 Prop,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/HONGYI-Propeller-10x4-7-Multi-Copter-Accessories/dp/B08524JF74>. [Último acceso: 2021].

- [32] Ardupilot, «Advanced Tuning,» 2020. [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/tuning.html>. [Último acceso: 2021].
- [33] E. S. Cruz, «Propuesta de sistema multi AV para aplicaciones de cobertura de área,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/456309/eesc1de1.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 2021].
- [34] S. A. Valverde, A. B. Contreras, C. M. Granados y R. R. Donadio, «Diseño de un sistema de adquisición de datos para fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV),» 2016. [En línea]. Available: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v29n4/0379-3982-tem-29-04-92.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [35] F. Sarmiento, «¿Donde trabaja un ingeniero mecánico?,» 25 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://2000carreras.com/cuanto-gana-un-ingeniero-mecanico-al-mes-en-2017-actualizado/>. [Último acceso: 2021].
- [36] SenseFly, «Introducing the senseFly eBee X With MicaSense RedEdge-MX, A Seamless Dual Solution for Accurate & Efficient Crop Analysis,» [En línea]. Available: <https://www.sensefly.com/2019/03/13/introducing-the-sensefly-ebex-with-micasense-rededge-mx/>. [Último acceso: 2021].
- [37] DronesNerds, «DJI P4 Multispectral Agriculture Drone with D-RTK 2 Mobile Base Station,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.dronenerds.com/products/drones/enterprise-drones/phantom-4-enterprise/p4-multispectral-with-drtk.html>. [Último acceso: 2021].
- [38] DJI Store, «Matrice 300 RTK,» 2021. [En línea]. Available: <https://m.dji.com/product/matrice-300-rtk-and-dji-care>. [Último acceso: 2021].
- [39] Arduino.cl, «Arduino UNO,» 2018. [En línea]. Available: <https://arduino.cl/arduino-uno/>. [Último acceso: 2021].
- [40] Ardupilot, «Pixhawk Overview,» [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>. [Último acceso:

2021].

- [41] Amazon, «Motor sin escobillas SunnySky X2212-13,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/powerday-X2212-13-Brushless-Sunnysky-Quadcopter/dp/B07DG2RWB9>. [Último acceso: 2021].
- [42] Amazon, «HP Simonk 30 A ESC Controlador de velocidad sin escobillas para Multicopter,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/Hobbypower-Controlador-escobillas-Multicopter-F450-F550-X525/dp/B00VJVE55U>. [Último acceso: 2021].
- [43] F. León, «Baterías LiPo, características y cuidados,» 2018. [En línea]. Available: <https://dynamoelectronics.com/baterias-lipo-caracteristicas-y-cuidados/>. [Último acceso: 2021].
- [44] Amazon, «Batería Lipo 4s 14,8v 9000mah Zee,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/9000mAh-batería-conector-placas-compatible/dp/B07YP73LMX>. [Último acceso: 2021].
- [45] Electronilab, «Módulo GPS Ublox NEO-M8N-001,» [En línea]. Available: <https://electronilab.co/tienda/modulo-gps-ublox-neo-m8n-001-con-memoria-eeeprom/>. [Último acceso: 2021].
- [46] Sensefly, «Parrot Sequoia+ Cámara multiespectral,» [En línea]. Available: <https://www.sensefly.com/es/camera/parrot-sequoia/>. [Último acceso: 2021].
- [47] Ardupilot, «Camera Shutter Triggering,» 2020. [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-apm-to-chdk-camera-link-tutorial.html>. [Último acceso: 2021].
- [48] Naylamp, «SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DHT11,» [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/57-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11.html>. [Último acceso: 2021].
- [49] OpenCircuit, «GRAVITY : SENSOR DE TEMPERATURA ANALÓGICO LM35 PARA ARDUINO,» [En línea]. Available: <https://opencircuit.es/Product/Gravity-:-Sensor->

temperatura-analógico-LM35. [Último acceso: 2021].

- [50] AV Electronics, «Módulo GPS NEO-6M,» 2021. [En línea]. Available: <https://avelectronics.cc/producto/modulo-gps-neo-6m/>. [Último acceso: 2021].
- [51] L. Llamas, «Tarjeta Micro SD,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/tarjeta-micro-sd-arduino/>. [Último acceso: 2021].
- [52] A. Schoellig, C. Wiltsche y R. D'Andrea, «Feed-Forward Parameter Identification for Precise Periodic Quadrocopter Motions,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.dynsyslab.org/wp-content/papercite-data/pdf/schoellig-acc12.pdf>. [Último acceso: 2021].
- [53] Estudios de Suelos, Geología y Ambiental ESGA, «MOSAICO DRONE,» 2018. [En línea]. Available: <https://estudiosdesuelosygeologia.wordpress.com/2018/06/13/fotogeologia-y-sensoramiento-remoto-de-imagenes/mosaico-drone/>. [Último acceso: 2021].

# **ANEXOS**

# ANEXO A

## Modelo matemático

Antes de realizar el modelo matemático (aerodinámico), es importante conocer el comportamiento de la posición y orientación del vehículo aéreo. Para esto, se considera que la estructura es simétrica, y que su centro de masa se ubica en el origen del sistema de coordenadas fijo a éste.

En la Figura 2.9, se observa dos sistemas de coordenadas:

$$\vec{B} = [\vec{X}_L, \vec{Y}_L, \vec{Z}_L]$$
$$\vec{I} = [\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}]$$

El primero corresponde al sistema de coordenadas propio del dron, y el segundo es respecto a la tierra o también llamado inercial. Se debe conocer la rotación del robot aéreo, representada por  $\mathbf{R}$ , para esto se utiliza la rotación según  $\vec{X}$  de  $\phi$ , la rotación según  $\vec{Y}$  de  $\theta$  y la rotación según  $\vec{Z}$  de  $\psi$ , donde  $(\phi, \theta, \psi)$  son los ángulos de Euler que representan la orientación del dron, conocidos como roll, pitch y yaw, respectivamente.

### Matriz rotacional en roll

$$R(X, \phi) = \begin{bmatrix} \vec{X}_1 \\ \vec{Y}_1 \\ \vec{Z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X}_L \\ \vec{Y}_L \\ \vec{Z}_L \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

### Matriz rotacional en pitch

$$R(Y, \theta) = \begin{bmatrix} \vec{X}_2 \\ \vec{Y}_2 \\ \vec{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X}_1 \\ \vec{Y}_1 \\ \vec{Z}_1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

### Matriz rotacional en yaw

$$R(Z, \psi) = \begin{bmatrix} \vec{X}_3 \\ \vec{Y}_3 \\ \vec{Z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{X}_2 \\ \vec{Y}_2 \\ \vec{Z}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Con las ecuaciones A.1, A.2 y A.3 se determina la matriz de transformación  $\mathbf{R}$ , conocida también como matriz de rotación completa:

$$R(\phi, \theta, \psi) = R(X, \phi) * R(Y, \theta) * R(Z, \psi)$$

$$R(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\cos\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

La matriz de transformación  $\mathbf{R}$  expresa el movimiento de traslación del cuadricóptero.

Siendo  $\omega = (p, q, r)^T$ , el vector de velocidades angulares respecto a  $\vec{B}$ , y  $\eta = (\phi, \theta, \psi)^T$ , el vector ángulos de euler respecto a  $\vec{I}$ . La relación entre  $\dot{\eta}$  y  $\omega$  es:

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T\omega \quad (\text{A.5})$$

Siendo  $T$  la matriz de euler:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Es decir,  $\dot{\eta}$  va a ser igual a:

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Finalmente, debido que los ángulos roll y pitch son pequeños, se obtiene con la ecuación A.7, que las velocidades angulares respecto a  $\vec{B}$  serán iguales a las velocidades angulares respecto a  $\vec{I}$ .

$$\begin{aligned} p &= \dot{\phi} \\ q &= \dot{\theta} \\ r &= \dot{\psi} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

La dinámica no lineal del vehículo aéreo de cuatro rotores puede ser expresada como:

$$\begin{bmatrix} mI_{3x3} & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \times I\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_B \\ \tau_B \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Donde  $F_B \in \vec{B}$  son las fuerzas externas del dron,  $\tau_B \in \vec{B}$  son los pares producidos por los rotores,  $I_{3x3}$  es la matriz identidad,  $V$  es el vector velocidad lineal respecto a  $\vec{B}$ , e  $I$  es la matriz de inercia, la cual es diagonal debido que la

estructura del sistema es simétrica. La matriz de inercia se representa de la siguiente manera:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Por otro lado, se tiene la expresión que representa las fuerzas que desarrolla el dron, como la fuerza que provoca el movimiento lineal, las fuerzas a causa de los movimientos roll y pitch, y el torque a causa del movimiento yaw. Estas cuatro variables son representadas por  $U_1, U_2, U_3, U_4$ , respectivamente.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ b(\Omega_4^2 + \Omega_3^2 - \Omega_1^2 - \Omega_2^2) \\ b(\Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_1^2 - \Omega_4^2) \\ d(\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Donde  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ , son las velocidades angulares de producidas por cada motor, y las constantes  $b, d$  son el coeficiente de empuje y arrastre del motor.

A partir de la expresión de la ecuación A.9 y A.11, se encuentra el modelo no lineal del vehículo, como se encuentra descrito en la Sección 2.7.

## ANEXO B

### Selección de las partes eléctricas del dron

- **Microprocesador:** Es un dispositivo que se encarga de cumplir las instrucciones lógicas y deberes implicados en el sistema informático. Por lo cual, se seleccionó al ordenador que se muestra en la Figura B.1, el Arduino UNO, para que sea la unidad central de procesamiento del proyecto y gestione el almacenamiento de la información obtenida por los demás elementos a través de una tarjeta microSD. Además, en la Tabla B.1 se detallan las características de este equipo.



Figura B. 1 Placa de Arduino UNO [39].

Tabla B. 1 Especificaciones técnicas de Arduino UNO [39].

Características	Datos
Microcontrolador	ATMega328P
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Pines Digitales	14
Pines Digitales PWM	6
Pines Analógicos	6
Memoria Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

- **Controlador de vuelo:** Es un elemento que permite que el dron realice movimientos deseados o preestablecidos en el programa gracias a que tiene la capacidad de girar los motores en la forma requerida.

En la Figura B.2, se observa el autopiloto PIXHAWK, el cual fue elegido debido a su versatilidad de fuente abierta, su procesador y los sensores integrados. Las características de este equipo se presentan a continuación en la Tabla B.2.



Figura B. 2 Puertos del Controlador de vuelo Pixhawk [40].

Tabla B. 2 Especificaciones técnicas del Pixhawk [40].

Característica	Dato
Procesador	32-bit ARM Cortex M4 core FPU 168 Mhz/256 KB RAM/2 MB Flash 32-bit failsafe coprocesador
Sensores	MPU6000, ST Micro 16-bit, ST Micro 14-bit, MEAS
Alimentación	Cable de alimentación directo a la placa o energía proveniente de los controladores de velocidad

Puertos	5x UAR Spektrum DSM/DSM2/DSM-X GPS Futaba S. Bus Salida PPM sum señal RSSI (PWM) entrada I2C, SPI, 2x CAN, USB ADC entradas
---------	---

- **Motor:** Para este diseño se escogieron a los motores brushless debido a que estos se utilizan para la propulsión de multirrotores, se basan en una alimentación en corriente continua y la ausencia de escobillas para efectuar la variación de polaridad en sus embobinados.

El proceso de selección del modelo se llevó a cabo a través del cálculo del empuje y potencia requerida por cada motor, los cuales se presentan en la Sección 2.8.

En la Figura B.3, se puede observar el motor brushless seleccionado, un SunnySky X2212-13, el cual cuenta con una máxima potencia continua de 300 W, máxima corriente continua de 15 A y 980 KV.



**Figura B. 3 Motor brushless SunnySky X2212-13 [41].**

En la Tabla B.3 se presentan las características del motor escogido y también los tipos de hélices recomendados por el fabricante.

**Tabla B. 3 Especificaciones técnicas del motor SunnySky X2212-13 [41].**

<b>Característica</b>	<b>Dato</b>
Diámetro del estator	22 mm
Grosor del estator	12 mm
No. de brazos del estator	12
No. de polos del estator	14
KV del motor	980
Resistencia del motor	133 mΩ
Máxima corriente continua	15 A
Máxima potencia continua	300 W
Peso	58.5 kg
Max Celda LiPo	2-4 S
ESC	20 A
Hélices Recomendadas	APC8038, APC9047, APC1047, GWS8043, APC8030

El tipo de hélice seleccionando para este motor fue la APC1047, la cual está fabricada de fibra de carbono y cuenta con un diámetro de 10 pulgadas y un paso de 4.7 pulgadas. En la Tabla B.4 se detalla que con un voltaje de 14.8 V se llega a 298.96 W a una temperatura de 77° con un empuje de hasta 1.15 kg.

**Tabla B. 4 Especificaciones técnicas para las hélices APC1047 [31].**

<b>Hélices</b>	<b>Volts (V)</b>	<b>Amps (A)</b>	<b>Empuje (g)</b>	<b>Watts (W)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
APC 1047	11.1	0.7	100	7.77	
		1.8	200	19.98	
		3	300	33.3	
		4.6	400	51.06	
		6.2	500	68.82	
		8.4	600	93.24	
		10.8	700	119.88	

		13	800	144.3	
		15.5	910	172.05	
	14.8	0.5	100	7.4	
		1.3	200	19.24	
		2.5	300	37	
		3.8	400	56.24	
		5.2	500	76.96	
		6.7	600	99.16	
		8.5	700	125.8	
		10.6	800	156.88	
		13	900	192.4	
		15.2	1000	224.96	
		20.2	1150	298.96	

- **Variador de velocidad (ESC):** Es un dispositivo que produce una señal trifásica para alimentar al motor. A su vez, controla la velocidad de giro del motor, dirección y actúa de freno dinámico por medio de una señal proporcionada por el PWM.

El ESC elegido se relaciona al consumo máximo de corriente continua del motor, el cual es 15 A. Por lo tanto, para lograr abastecerlo, el variador escogido es el HP SimonK 30A ESC, tal como se muestra en la Figura B.4.



**Figura B. 4 ESC HP SimonK 30A [42].**

En la Tabla B.5, se presentan sus características técnicas.

**Tabla B. 5 Especificaciones técnicas del ESC HP SimonK 30A [42].**

Descripción	Dato
Corriente Continua	30 A
Corriente Máxima	35 A
Entrada de Voltaje	2 – 4 Celdas tipo LiPo

- **Baterías:** El tipo de baterías seleccionadas son las de polímeros de litio, las cuales ofrecen beneficios, tales como corriente alta, mayor tasa de descarga, entre otros.

Es importante tomar en cuenta que el número de celdas influye en la tensión de las baterías. A continuación, en la Tabla B.6 se observa la clasificación de las baterías LiPo.

**Tabla B. 6 Clasificación de baterías de LiPo [43].**

Descripción	Voltaje (V)
1S	3.7
2S	7.4
3S	11.1
4S	14.8
6S	22.2

La batería LiPo seleccionada es de la marca Zeee, la cual se presenta en la Figura B.5 y sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla B.7.



**Figura B. 5 Batería LiPo 4S [44].**

**Tabla B. 7 Especificaciones técnicas de Batería LiPo 9000 mAh 4S [44].**

Descripción	Dato
Capacidad mínima	9000 mAh
Voltaje	14.8 V
Configuración de celda	4 celdas
Tasa de descarga	100 C
Tipo de conector	T Deans plug
Enchufe de carga	JST-XH

- **Módulo GPS:** Este dispositivo se basa en establecer un vínculo con un satélite y enviar esos datos al controlador de vuelo.

El módulo GPS seleccionado es el modelo NEO-M8N que se muestra en la Figura B.6, el cual cuenta con las especificaciones técnicas que se presentan en la Tabla B.8.



**Figura B. 6 Módulo GPS NEO-M8N [45].**

**Tabla B. 8 Especificaciones técnicas del módulo GPS NEO-M8N [45].**

Descripción	Dato
GNSS concurrente	Hasta 10 Hz
Sensibilidad de seguimiento	-161 dBm
Sensibilidad de captura	-148 dBm
Tiempo de captura	0,1 s promedio
Voltaje de la fuente de alimentación	+3,5 V ~ + 5,5 V

## ANEXO C

### Selección de las partes eléctricas del sistema de adquisición de datos

- **Cámara Multi espectral:** Este tipo de cámaras son idóneas para los trabajos relacionados con agricultura de precisión debido a que son capaces de captar y medir la luz dentro del espectro visible.

La cámara Parrot Sequoia, la cual se presenta en la Figura C.1, permite conocer el rendimiento de los cultivos, siendo de gran ayuda para los agricultores puesto que les brinda la capacidad de implementar soluciones ante distintas posibilidades.



Figura C. 1 Cámara Parrot Sequoia [46].

En la Tabla C.1 Se detallan las especificaciones técnicas de la cámara multiespectral seleccionada.

Tabla C. 1 Especificaciones técnicas de la cámara Parrot Sequoia [46].

Descripción	Dato
Almacenamiento	64 GB
Bandas	Verde, Rojo, Rojo edge e Infrarrojo cercano
Definición RGB 16 MPIX	4608x3456 píxeles
Definición 4 cámaras	1280x960 píxeles
Protocolo estándar	PTP

- **Cable de comunicación de la cámara:** Este componente se utiliza para conectar la cámara seleccionada con el controlador de vuelo, con el fin de que al ejecutarse el comando de programación se capture una imagen.

En la Figura C.2 se presenta el cable elegido, el cual forma parte de la línea de Pixhawk, por lo tanto, es compatible con la parte eléctrica del dron.



**Figura C. 2 Cable de comunicación Pixhawk [47].**

- **Sensor Humedad:** Es un elemento que tiene como función determinar la humedad del aire para registrar y dar seguimiento de los cambios en esta variable.

El sensor escogido es el de humedad relativa DHT11, el cual se presenta en la Figura C.3 y más adelante, en la Tabla C.2 se detallan sus especificaciones técnicas.



**Figura C. 3 Sensor de humedad DHT11 [48].**

**Tabla C. 2 Especificaciones técnicas del sensor DHT11 [48].**

Descripción	Dato
Voltaje de Operación	3V - 5V DC
Rango de medición de temperatura	0 a 50 °C
Precisión de medición de temperatura	±2.0 °C
Resolución Temperatura	0.1°C
Rango de medición de humedad	20% a 90% RH
Precisión de medición de humedad	5% RH
Resolución Humedad	1% RH
Tiempo de sensado	1 seg

- **Sensor Temperatura:** Es un dispositivo que permite conocer la temperatura del lugar en el que se encuentra con el fin de monitorear las variaciones.

El elemento elegido es el sensor de temperatura analógico LM35, el mismo que se observa en la Figura C.4.



**Figura C. 4 Sensor de temperatura LM35 [49].**

A continuación, en la Tabla C.3 se detallan sus especificaciones técnicas.

**Tabla C. 3 Especificaciones técnicas del sensor de temperatura LM35 [49].**

Descripción	Dato
Voltaje de funcionamiento	3,3 V/5 V
Corriente de funcionamiento	2,7 $\mu$ A
Temperatura de funcionamiento	-40.0 °F - 302.0 °F
Rango de medición de temperatura	32.0 °F - 212.0 °F
Precisión de medición de temperatura	32.9 °F
Desviación de temperatura	$\pm$ 32.9 °F
Sensibilidad	10 mV por grados Celcius

- **Módulo GPS:** Este elemento es capaz de obtener parámetros se basa en recibir la posición.

El módulo GPS elegido es el modelo NEO-6M que se detalla en la Figura C.5 y presenta las especificaciones técnicas de la Tabla C.4.



**Figura C. 5 Módulo GPS NEO-6M [50].**

**Tabla C. 4 Especificaciones técnicas del módulo GPS NEO-6M [50].**

Características	Datos
Voltaje de alimentación	3-5 VDC
Interfaz	Serial UART 5V
Frecuencia de refresco	5 Hz
Baud rate por defecto	9600 bps

- **Módulo Tarjeta Micro SD:** Es un adaptador de voltaje que permite introducir una tarjeta Micro SD, con el fin de conectarla al microprocesador. El módulo Micro SD es el que se presenta en la Figura C.6.



**Figura C. 6 Módulo Micro SD [51].**

## ANEXO D

### Peso de componentes eléctricos

Tabla D. 5 Peso de componentes eléctricos.

HARDWARE	CANTIDAD	PESO UNITARIO (g)	PESO TOTAL (g)
Arduino UNO	1	23	23
Controlador de vuelo PIXHAWK	1	38	38
HP SimonK 30A ESC	4	22	88
Motor Sunny Sky X2212-13	4	58.5	234
Batería LiPo 9000mAh	3	632	1896
Cámara Parrot Sequoia	1	72	72
Cable PIXHAWK	1	11	11
Módulo Micro SD	1	5	5
Módulo GPS NEO-6M	1	9	9
Módulo GPS NEO-M8N	1	33	33
Sensor de temperatura	1	2	2
Sensor de humedad	1	1	1
Otros	1	30	30
		<b>TOTAL</b>	2442

# ANEXO E

## Selección del material

Después de haber realizado una búsqueda profunda, se obtuvo que las propiedades que más importan para seleccionar un material para el robot agrícola son las siguientes:

**Tabla E. 1 Propiedades a considerar para la selección del material.**

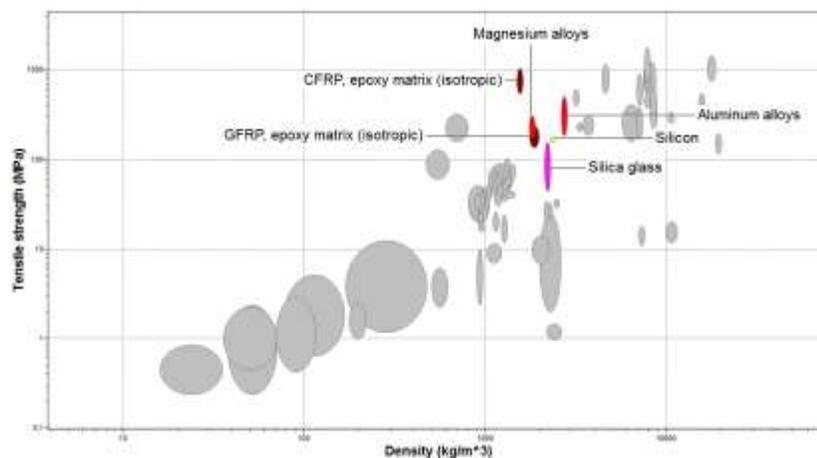
Propiedad	Motivo	Unidad
<b>Densidad</b>	Propiedad primordial, ya que el sistema debe ser lo más ligero posible para ser capaz de moverse en su entorno de trabajo. A mayor densidad, significa que el motor necesitaría entregar una mayor fuerza, es decir dar una mayor potencia, por lo que el tamaño de algunas partes mecánicas del robot aumentaría, generando problemas.	kg/m <sup>3</sup>
<b>Precio</b>	Aunque parezca no importante, el precio también debe ser considerado a la hora de seleccionar un material, debido que es una variable que cambia con el tiempo, además que influye en la calidad del producto y la cantidad que se fabrique.	\$ /kg
<b>Dureza</b>	Una mayor dureza significaría que el vehículo aéreo será capaz de soportar algún choque que sufra con objetos no deseados, disminuyendo daños en su estructura y ser menos susceptible a derribos.	Brinell HB
<b>Resistencia a la Fatiga</b>	El vehículo aéreo experimenta oscilaciones a causa del viento, lo que significa que puede fallar por fatiga después de algunos ciclos de trabajo. Por esta razón, se debe considerar un material que posea una vida útil elevada.	MPa
<b>Huella de Carbono</b>	Aunque no tiene alguna influencia la huella de carbono en el funcionamiento del dron, se considera esta propiedad, debido que se trata de crear un sistema amigable con el ambiente. Entre más elevado sea este valor, significa que mayores emisiones de gases de efecto invernadero se generan en su producción, es decir es menos amigable con el ambiente.	kg/kg

El otro paso fue colocar un rango de valores aceptables para cada una de estas propiedades, para luego conocer cuáles materiales lo posee y realizar la respectiva selección.

**Tabla E. 2 Rango de valores propuestos según la propiedad para la selección del material.**

Propiedad	Valor Mínimo	Valor Máximo
Densidad	1	3000
Precio	1	100
Dureza	20	3000
Resistencia a la Fatiga	75	10000
Huella de Carbono	1	50

Debido que existen bastantes materiales, puede resultar muy complicado verificar cuáles cumplen con el rango de valores propuesto anteriormente. Por esta razón, se utilizó el software CES EduPack que posee información de más de 70 materiales para ingeniería. Con esta herramienta, se realizó un filtro de los valores mencionados anteriormente y se obtuvo que los materiales que se pueden utilizar para el diseño del dron son seis: Aleaciones de magnesio, aleaciones de aluminio, silicio, fibra de vidrio, fibra de carbono y vidrio de sílice, como se evidencia en la siguiente Figura D.1, donde los colores grises significan los materiales que no cumplieron con las especificaciones dadas.



**Figura E. 1 Materiales que cumplieron con el rango de valores propuestos.**

# ANEXO F

## Ecuaciones de control

A continuación, se detallan las ecuaciones de control para el controlador de posición (lateral), de altitud y de orientación, los cuales forman parte de la arquitectura de control de un dron de cuatro rotores.

Para realizar un correcto control de los movimientos laterales del vehículo, se necesita de un controlador de tipo PD, con el objetivo de comandar los valores de la matriz de rotación. La ecuación que describen este tipo de control se muestra a continuación:

$$\ddot{x}_{comand} = c b_c^x$$

$$\ddot{x}_{comand} = k_p^x(x_t - x_a) + k_d^x(\dot{x}_t - \dot{x}_a) + \ddot{x}_t \quad (F.1)$$

Donde  $b_c^x$  y  $b_c^y$  son elementos de la matriz de rotación y  $c$  es la relación entre el empuje y el peso del sistema. En la ecuación F.1 se aprecia la ecuación de control respecto a  $x$ . La resta entre  $x_t$  y  $x_a$  es el error de la posición, mientras que el error de la velocidad es la resta entre  $\dot{x}_t$  y  $\dot{x}_a$ , ambos errores se multiplican por la constante proporcional y derivativa, respectivamente. Cabe destacar, para el movimiento en  $y$  se hace lo mismo, sin embargo, se usa el elemento  $b_c^y$  en la ecuación de control.

Por otro lado, el controlador roll-pitch se encarga de ajustar los ángulos de cabeceo y alabeo. Para lograr esto, se utiliza un control P, es decir proporcional. Las ecuaciones de control se muestran a continuación, tomando en cuenta que el subíndice “c” significa el valor corregido, mientras que “a”, el actual:

$$\dot{b}_c^x = k_p(b_c^x - b_a^x) \quad (\text{F.2})$$

$$\dot{b}_c^y = k_p(b_c^y - b_a^y) \quad (\text{F.3})$$

Siendo  $b_a^x = R_{23}$ . Sin embargo, como se requiere transformar dichos valores en velocidades angulares con respecto al sistema propio del dron, se utiliza la siguiente multiplicación matricial:

$$\begin{pmatrix} P_c \\ P_q \end{pmatrix} = \frac{1}{R_{33}} \begin{pmatrix} R_{21} & -R_{11} \\ R_{22} & -R_{12} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{b}_c^x \\ \dot{b}_c^y \end{pmatrix} \quad (\text{F.4})$$

Otro controlador importante es el llamado de body rate, encargado de ajustar las velocidades angulares de cada eje. En este tipo de controlador, se necesita tener comandado los tres ángulos de Euler, los cuales son transformados en aceleraciones rotacionales.

$$P_{error} = p_c - p$$

$$\bar{u}_p = k_{p-p} P_{error} \quad (\text{F.5})$$

$$q_{error} = q_c - q$$

$$\bar{u}_q = k_{p-q} q_{error} \quad (\text{F.6})$$

$$r_{error} = r_c - r$$

$$\bar{u}_r = k_{p-r} r_{error} \quad (\text{F.7})$$

El controlador correspondiente yaw, es uno de los más sencillos, debido que es de tipo proporcional y no requiere de otras variables, por esta razón, la

constante proporcional es multiplicada por el error, como se observa en la ecuación F.8.

$$r_c = k_p(\psi_t - \psi_a) \quad (\text{F.8})$$

Finalmente, se necesita el controlador de altitud. Para esto, se requiere conocer la aceleración lineal, la cual puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{pmatrix} \quad (\text{F.9})$$

O también respecto a sus formas lineales individuales, como se muestra a continuación:

$$\ddot{x} = cb^x \quad (\text{F.10})$$

$$\ddot{y} = cb^y \quad (\text{F.11})$$

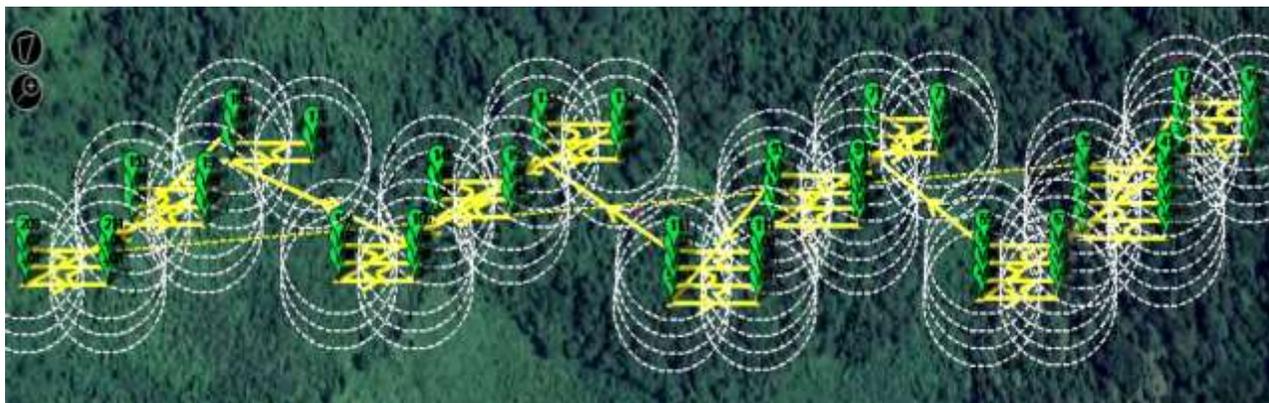
$$\ddot{z} = cb^z + g \quad (\text{F.12})$$

Siendo  $b^x = R_{13}$ ,  $b^y = R_{23}$  y  $b^z = R_{33}$ , es decir los valores de la última columna de la matriz de rotación. Por lo tanto, la ecuación de control queda expresada de la siguiente manera:

$$\bar{u}_1 = k_{p-z}(z_t - z_a) + k_{d-z}(\dot{z}_t - \dot{z}_a) + \ddot{z}_t \quad (\text{F.13})$$

## ANEXO G

### Planificaciones de vuelo extra



**Figura G. 1 Planificación de vuelo 2.**

La planificación de vuelo número 2 se basa en recorrer en sentido contrario a la ruta principal, obteniéndose un tiempo estimado de vuelo de 25 minutos con 3 segundos.



**Figura G. 2 Planificación de vuelo 3.**

En la planificación de vuelo número 3 se recorren espacios que no se tomaron en cuenta en las rutas anteriores, dando como resultado un tiempo estimado de vuelo de 25 minutos con 29 segundos.

## ANEXO H

### Comandos generados por Mission Planner

	Comandos	Delay				Lat	Long	Alt	Frame	Borrar	Arriba	Abajo	Grav %	Angle	Dist	AZ
1	TAKEOFF	20	0	0	0	0	0	30	Relative	X			0	0	0	0
2	DO_CHANGE_SPEED	0	5	0	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
3	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3054983	-79.6466632	20	Relative	X			0.0	0.0	885	270
4	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
5	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3054974	-79.6463535	20	Relative	X			0.0	0.0	35.1	90
6	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
7	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3054287	-79.6463537	20	Relative	X			0.0	0.0	7.6	360
8	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
9	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3054297	-79.6466685	20	Relative	X			0.0	0.0	35.0	270
10	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
11	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3053610	-79.6466678	20	Relative	X			0.0	0.0	7.6	1
12	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
13	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3053601	-79.6463539	20	Relative	X			0.0	0.0	34.9	90
14	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
15	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
16	DO_CHANGE_SPEED	0	5	0	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
17	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3052106	-79.6470062	20	Relative	X			0.0	0.0	74.4	283
18	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
19	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3052107	-79.6466785	20	Relative	X			0.0	0.0	36.4	90
20	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
21	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3051420	-79.6466792	20	Relative	X			0.0	0.0	7.6	360
22	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
23	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3051420	-79.6470068	20	Relative	X			0.0	0.0	36.4	270
24	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0

Figura H. 1 Comandos para cada punto de vuelo I.

25	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3050733	-79.6470074	20	Relative	X			0.0	0.0	7.6	360
26	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
27	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3050734	-79.6466796	20	Relative	X			0.0	0.0	36.4	90
28	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
29	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
30	DO_CHANGE_SPEED	0	5	0	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
31	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3049934	-79.6473531	20	Relative	X			0.0	0.0	75.4	277
32	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
33	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3049957	-79.6470164	20	Relative	X			0.0	0.0	37.4	90
34	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
35	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3049270	-79.6470162	20	Relative	X			0.0	0.0	7.6	0
36	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
37	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3049248	-79.6473531	20	Relative	X			0.0	0.0	37.4	270
38	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
39	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3048561	-79.6473531	20	Relative	X			0.0	0.0	7.6	0
40	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	12.6	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
41	WAYPOINT	1.5	0	0	0	-2.3048584	-79.6470160	20	Relative	X			0.0	0.0	37.5	90
42	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
43	DO_SET_CAM_TRIGG_DIST	0	0	1	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0
44	RETURN_TO_LAUNCH	0	0	0	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0

Figura H. 2 Comandos para cada punto de vuelo II.

# ANEXO I

## Código para adquisición de datos climáticos

```
// GPS
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TinyGPS.h>

TinyGPS gps;
SoftwareSerial serial2(7, 3);
float lat, lon;

// Micro SD
#include <SD.h>
File myFile;

// Sensor Temperatura
float tempC;
int pinTemp = 0;

// Sensor Humedad
#include <DHT.h>
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
byte hum;

void setup() {
  // GPS
```

```
Serial.begin(9600);
serial2.begin(9600);

//Micro SD
if (!SD.begin(4)) {
  Serial.println("No se pudo inicializar");
  return;
}
Serial.println("Inicializacion exitosa");

// Sensor Humedad
dht.begin();
}

uint16_t line = 1;

void loop() {

  delay(1000);

// GPS
  bool newData = false;
  unsigned long chars;
  unsigned short sentences, failed;

  for (unsigned long start = millis(); millis() - start < 1000;)
  {
    while (serial2.available())
    {
```

```
char c = serial2.read();
if (gps.encode(c))
    newData = true;
}
}

if (newData)
{
    gps.f_get_position(&lat, &lon);
    lat == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : lat, 6;
    lon == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : lon, 6;
}

gps.stats(&chars, &sentences, &failed);
if (chars == 0)
    Serial.println("No characters received from GPS: check wiring.");
delay(1000);

// Sensor Temperatura
int value = analogRead(pinTemp);
float millivolts = (value / 1023.0) * 5000;
tempC = millivolts / 10;
delay(1000);

// Sensor Humedad
hum = dht.readHumidity();

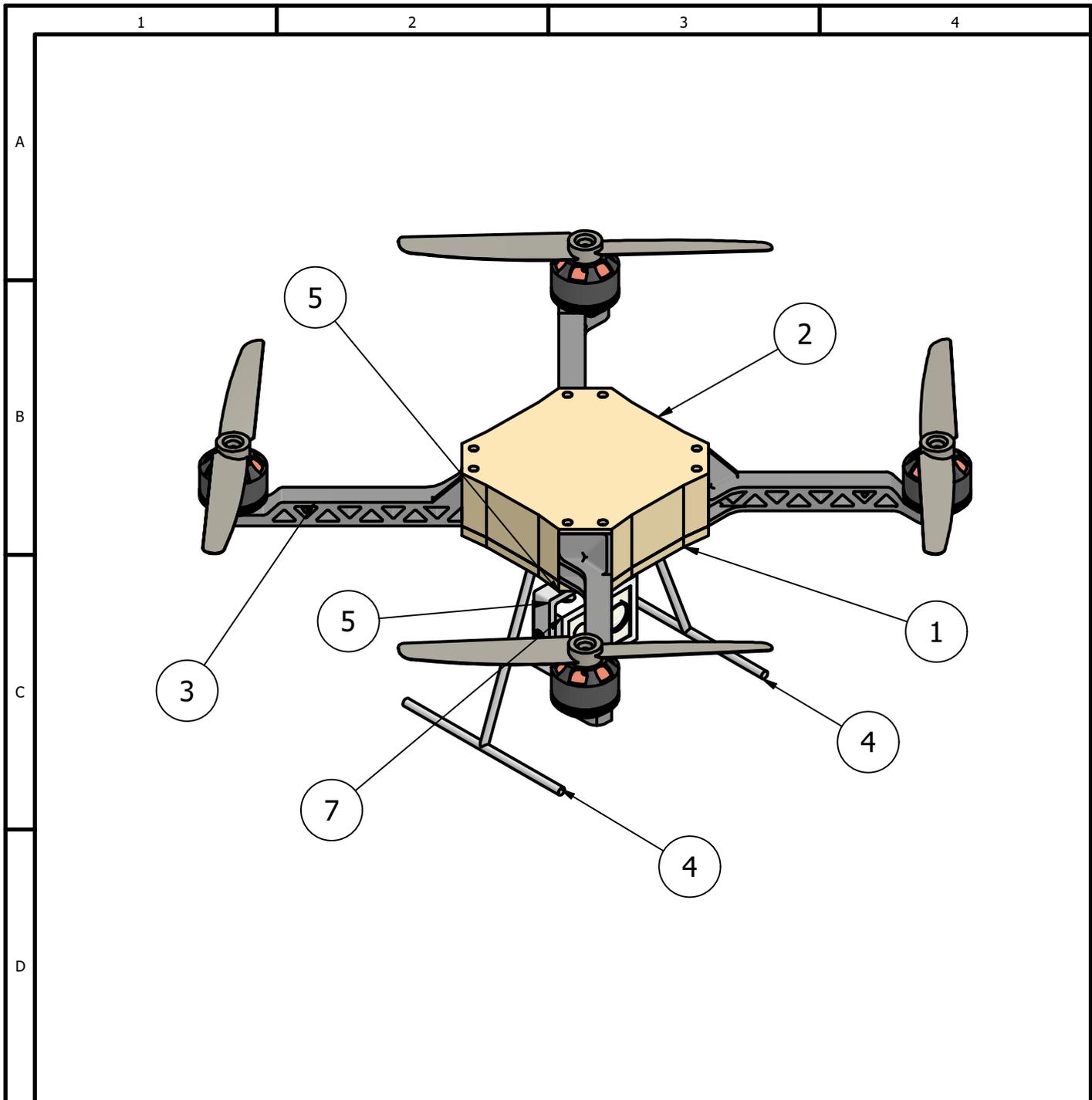
// Micro SD
myFile = SD.open("dataParam.txt", FILE_WRITE);
```

```
if (myFile) {
  if(lat && lon != 0){
    Serial.println("Escribiendo SD: ");
    Serial.print("Temperatura= ");
    Serial.print(tempC);
    Serial.print("C");
    Serial.print(", Humedad= ");
    Serial.print(hum);
    Serial.print("%");
    Serial.print(", Latitud= ");
    Serial.print(lat);
    Serial.print(", Longitud= ");
    Serial.println(lon);
    myFile.print("Temperatura= ");
    myFile.print(tempC);
    myFile.print("C");
    myFile.print(", Humedad= ");
    myFile.print(hum);
    myFile.print("%");
    myFile.print(", Latitud= ");
    myFile.print(lat);
    myFile.print(", Longitud= ");
    myFile.println(lon);

    myFile.close();
  }
} else {
  Serial.println("Error al abrir el archivo");
}
}
```

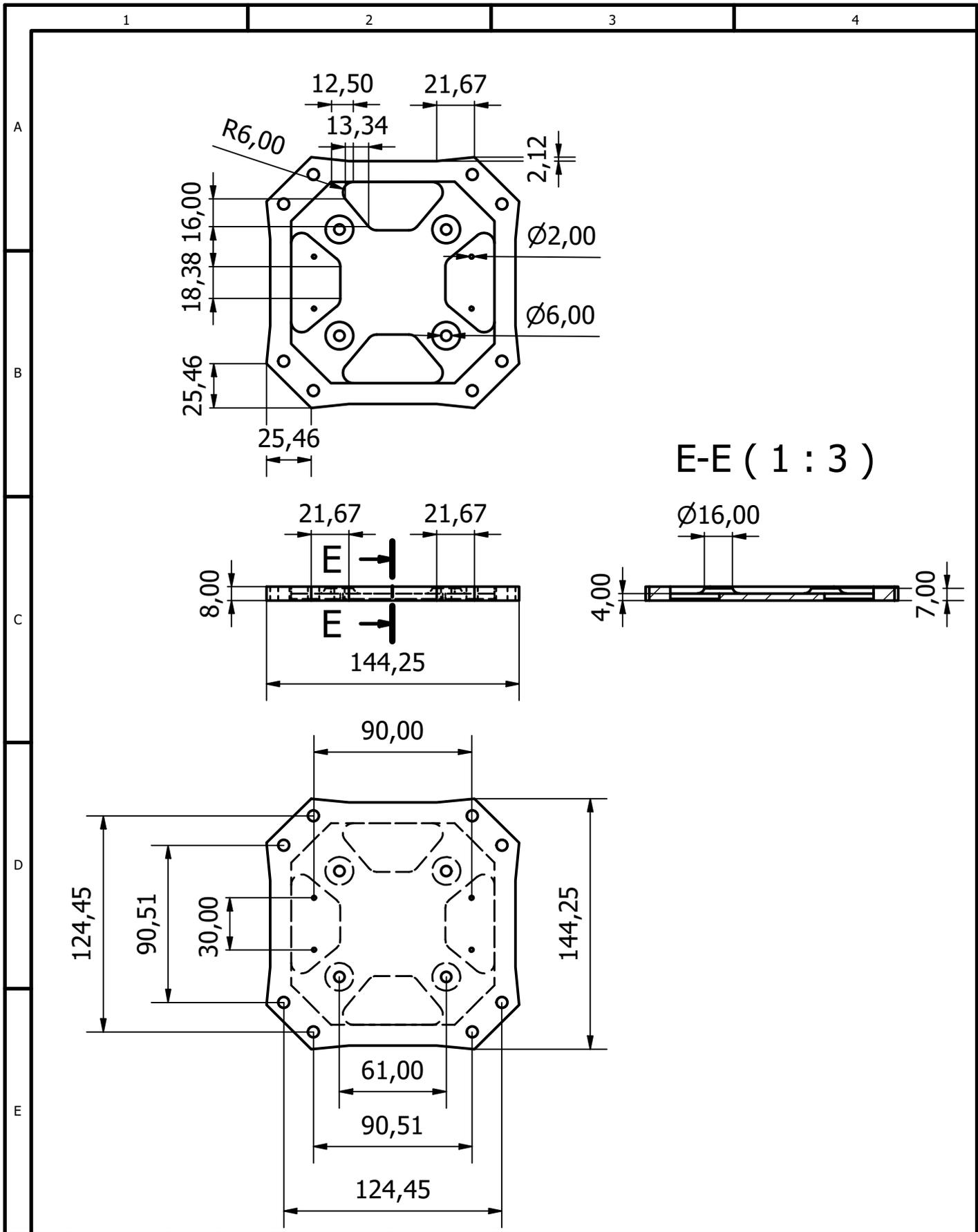
## **ANEXO J**

### **Planos**

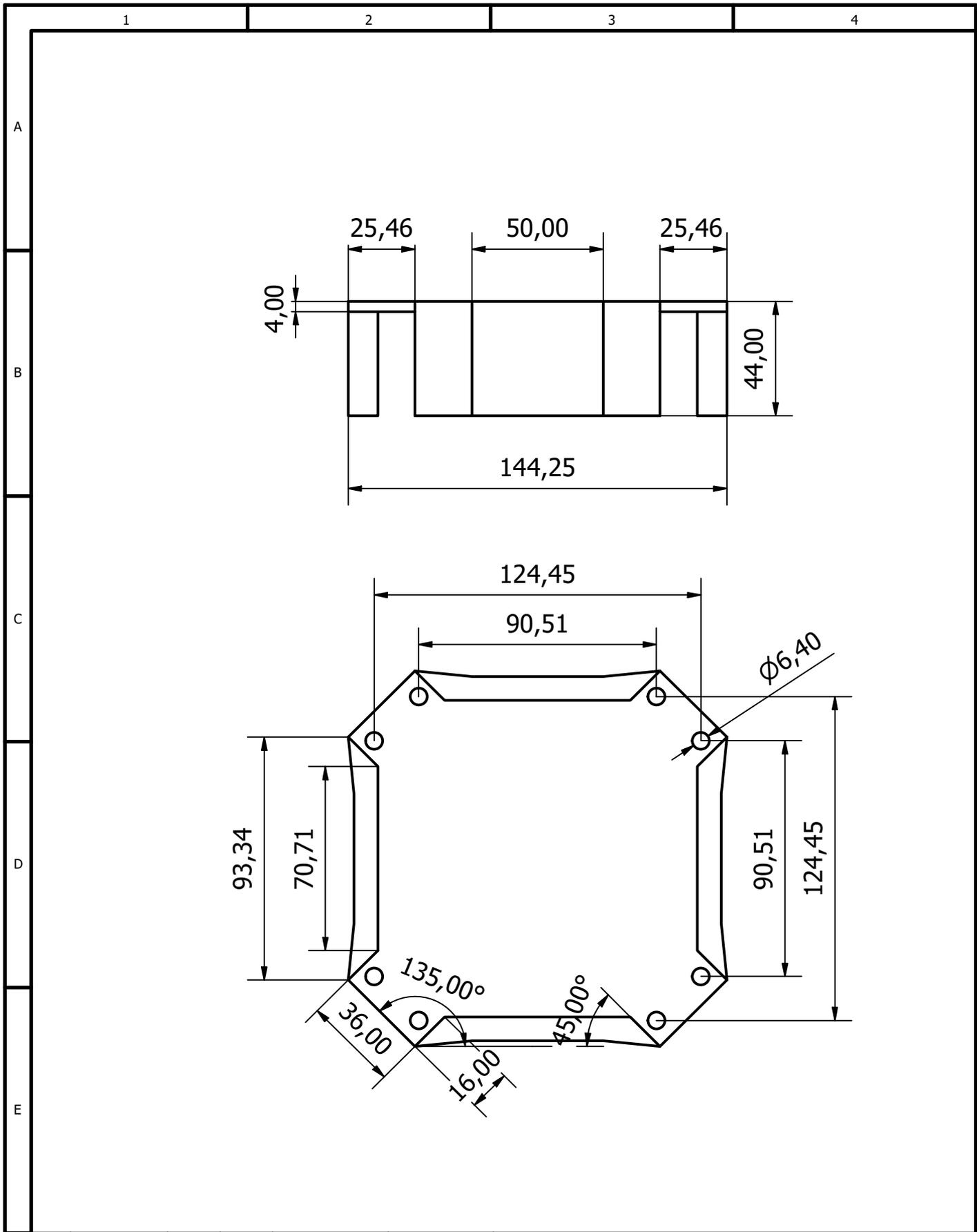


1	Plataforma Central	MCT-01	AI 7075	1		0.234	
1	Base Superior	MCT-02	AI 7075	2		0.503	
4	Brazo	MCT-03	Fibra de carbono	3		0.087	
2	Tren de Aterrizaje	MCT-04	AI 6061	4		0.023	
1	Soporte Cámara	MCT-05	AI 6061	5		0.074	
1	Soporte Cámara	MCT-06	AI 6061	6		0.052	
1	Soporte Cámara	MCT-07	AI 6061	7		0.100	
No. de piez.	Denominación	No. de Norma / Dibujo	Material	No. de orden	No. del Modelo / semiproducto	Peso Kg / pieza	Observaciones

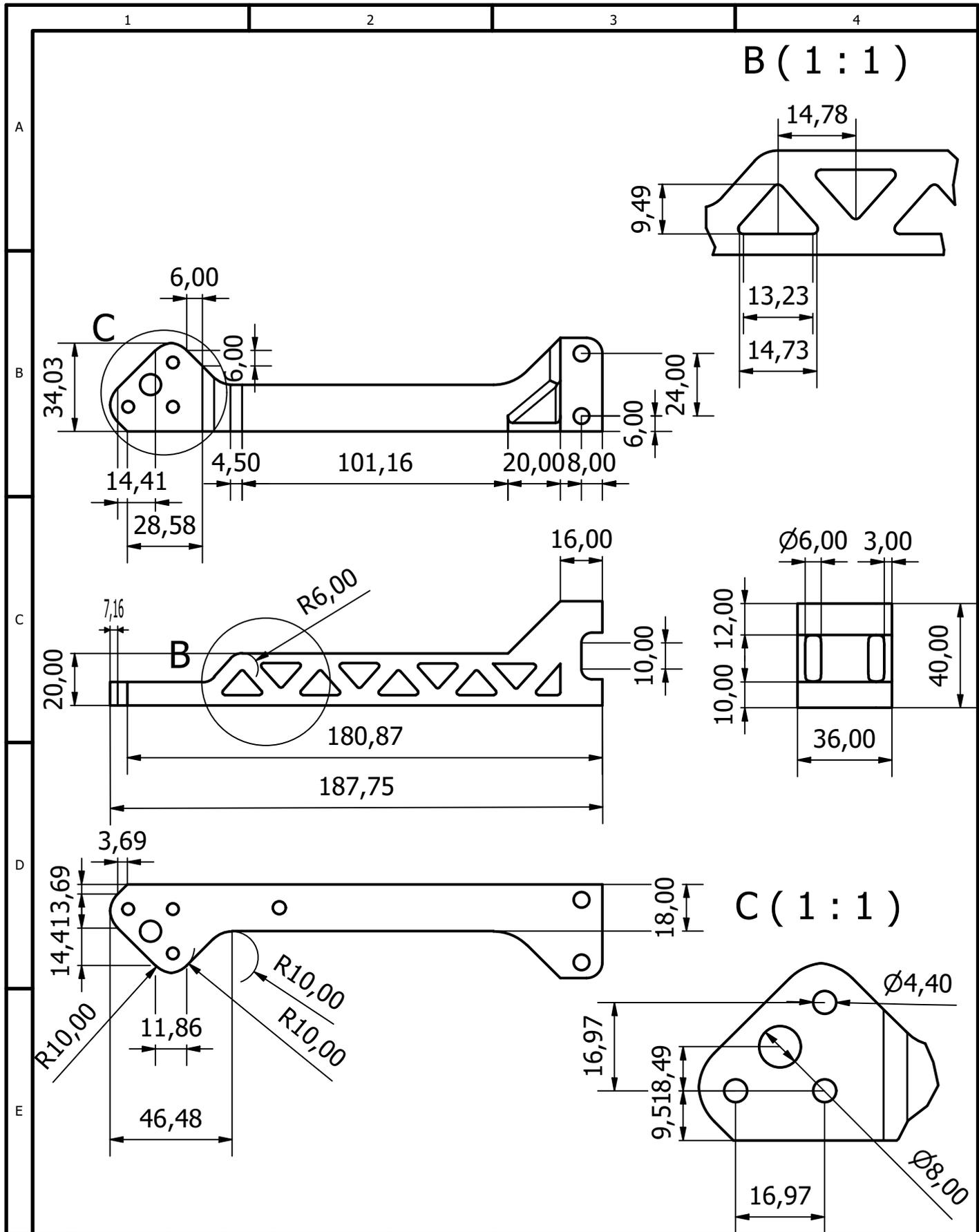
				Tolerancias:	Peso:	Materiales:			
					1.357 kg	VARIOS			
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala		
				Dib.	9/2/2021			ENSAMBLE CUADRICÓPTERO	1:4
				Rev.					
				Aprob.					
						Número de Dibujo	MCT-00		
						Sustituye a:			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						



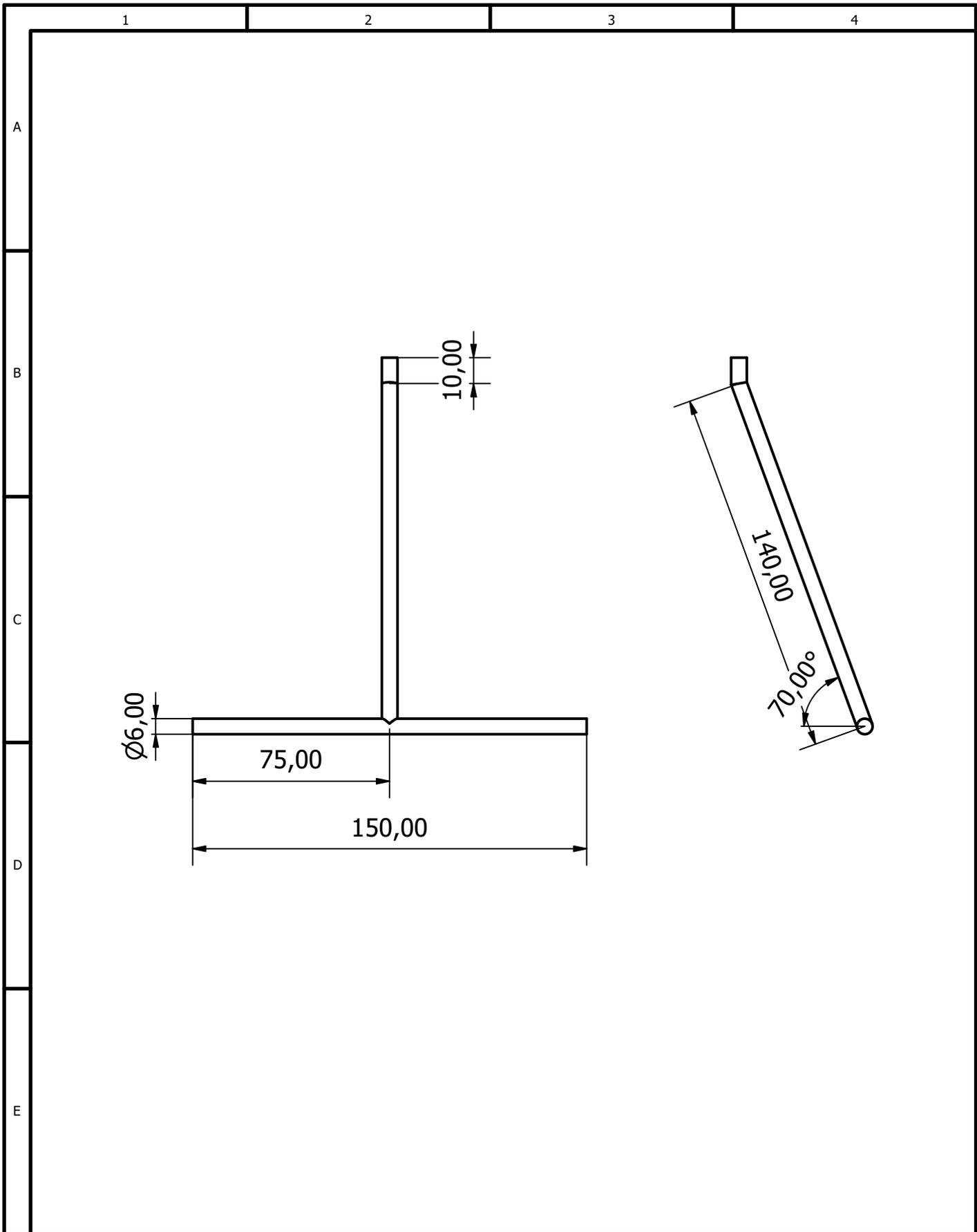
				Tolerancias:	Peso:	Materiales:	
					0.234 kg	ALUMINIO 7075	
				Fecha	Nombre	Denominación	
				Dib.	9/2/2021	ARMILIOS - CAMPOVERDE	
				Rev.		PLATAFORMA CENTRAL	
				Aprob.		Escala	
						Número de Dibujo	1:3
						MCT-01	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Sustituye a:			



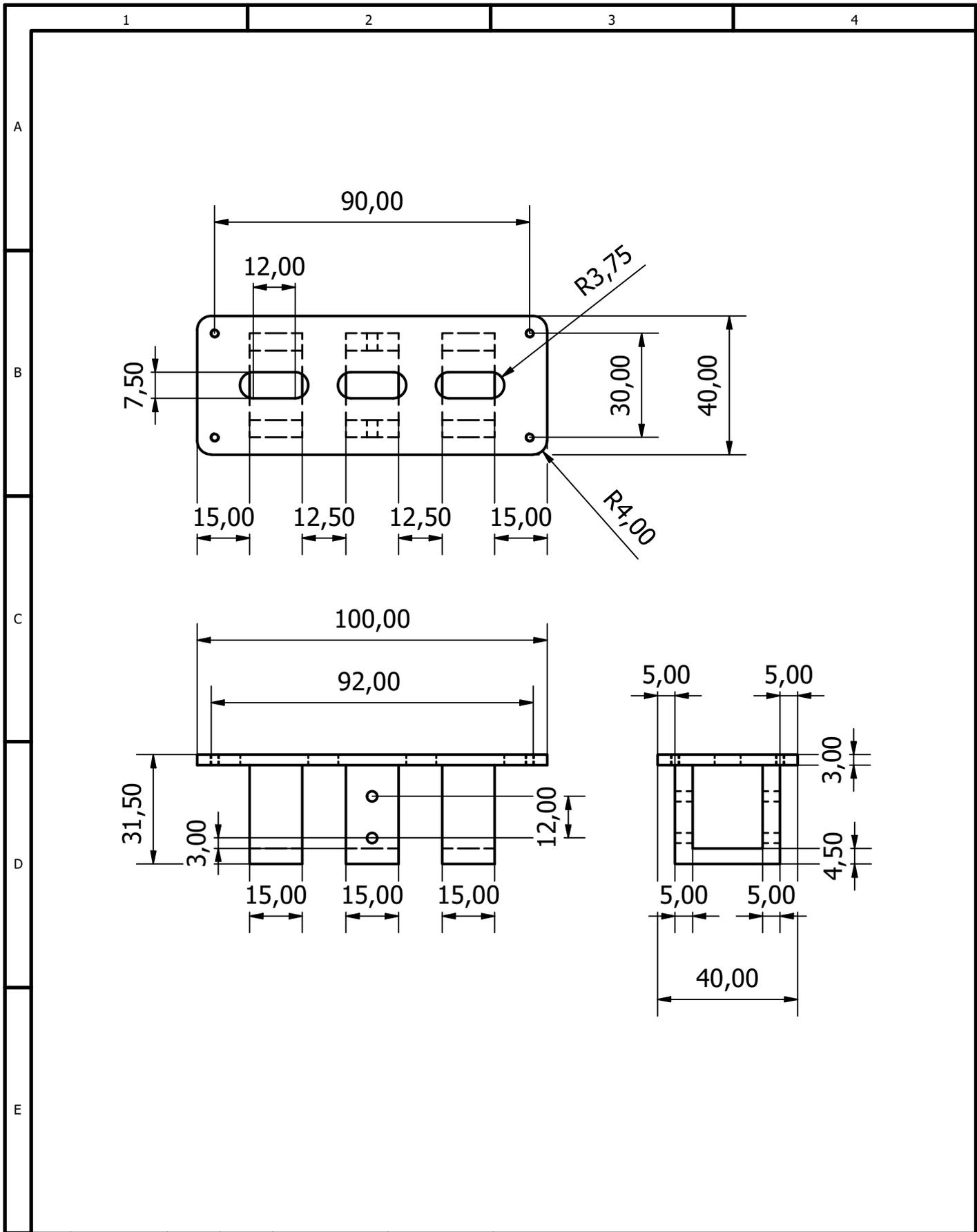
				Tolerancias:	Peso:	Materiales:			
					0.503 kg	ALUMINIO 7075			
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala		
				Dib.	9/2/2021			BASE SUPERIOR	1:2
				Rev.					
				Aprob.					
						Número de Dibujo			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			MCT-02		Sustituye a:	



				Tolerancias:	Peso:	Materiales:	
					0.087 kg	FIBRA DE CARBONO	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib.	9/2/2021	ARMIJOS - CAMPOVERDE	1:2
				Rev.			
				Aprob.			
						Número de Dibujo	
						Sustituye a:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

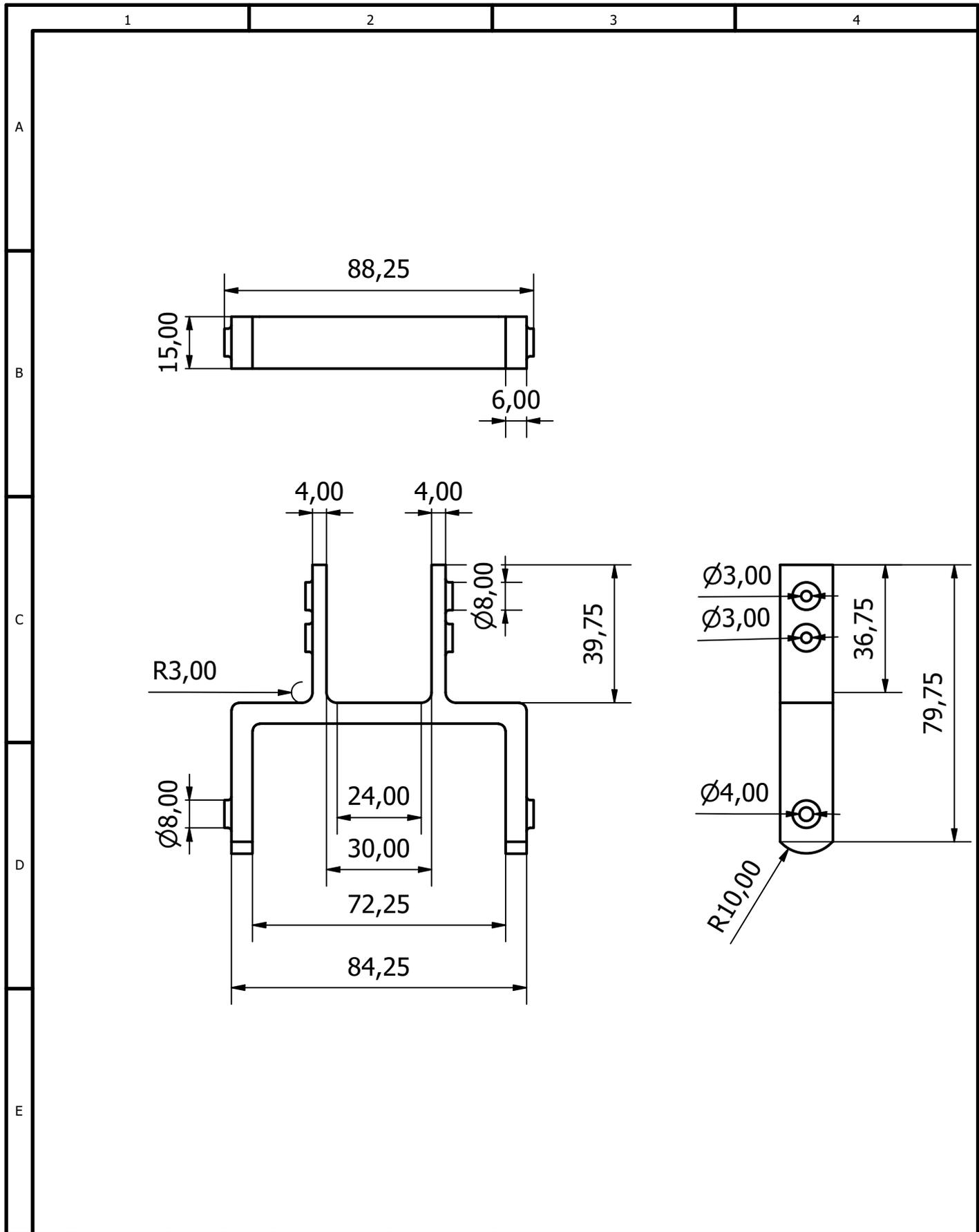


				Tolerancias:	Peso:	Materiales:	
					0.023 kg	ALUMINIO 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	9/2/2021	ARMILIOS - CAMPOVERDE	TREN DE ATERRIZAJE
				Rev.			Escala
				Aprob.			1:2
						Número de Dibujo	
						MCT-04	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Sustituye a:			



				Tolerancias:	Peso:	Materiales:	
					0.074 kg	ALUMINIO 6061	
				Fecha	Nombre	Denominación	
				Dib.	9/2/2021	ARMILIOS - CAMPOVERDE	
				Rev.			
				Aprob.			
						Número de Dibujo	MCT-05
						Sustituye a:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



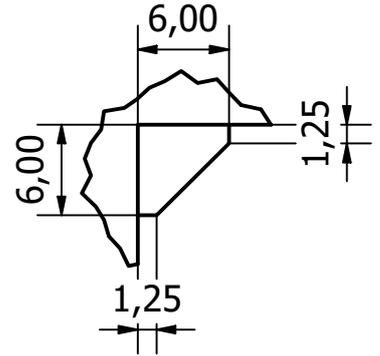


				Tolerancias:	Peso:	Materiales:	
					0.052 kg	ALUMINIO 6061	
						Denominación	Escala
				Dib.	Fecha	SOPORTE CÁMARA	1:1.5
				Rev.	Nombre		
				Aprob.	ARMILIOS - CAMPOVERDE		
						Número de Dibujo	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			MCT-06	

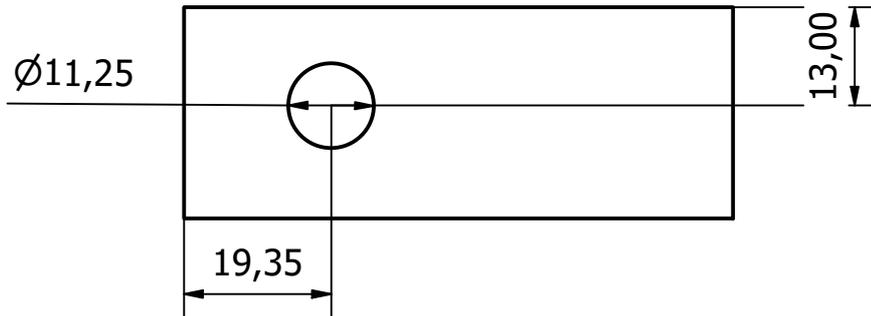
1 2 3 4

A

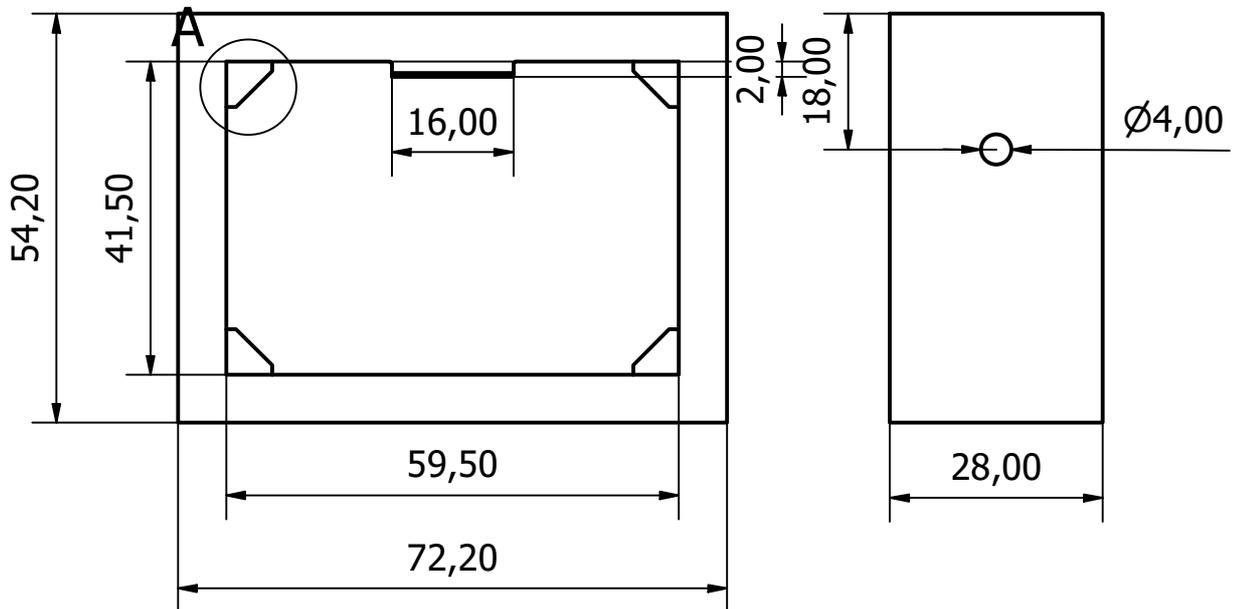
A ( 2:1 )



B



C



D

E

				Tolerancias:	Peso:	Materiales:		
					0.100 kg	ALUMINIO 6061		
						Denominación	Escala	
				Fecha	Nombre			
				Dib.	9/2/2021			ARMILIOS - CAMPOVERDE
				Rev.				
				Aprob.				
						Número de Dibujo	1:1	
						MCT-07		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustituye a:		