

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**KHALLWA: ROBOT AÉREO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL  
ESTADO DE MADUREZ DE ARÁNDANOS EN LOS ARBUSTOS  
UTILIZANDO APRENDIZAJE PROFUNDO**

**Tesis para obtener el título profesional de  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**AUTOR:**

Jason Luis Valera Espinoza

**ASESOR:**

Pedro Moisés Crisóstomo Romero

Lima, Diciembre, 2023

### Informe de Similitud

Yo, Pedro Moisés Crisóstomo Romero, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “KHALLWA: ROBOT AÉREO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE MADUREZ DE ARÁNDANOS EN LOS ARBUSTOS UTILIZANDO APRENDIZAJE PROFUNDO”, del autor Jason Luis Valera Espinoza, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 03/07/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: San Miguel, 04 de julio de 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Crisóstomo Romero, Pedro Moisés	
DNI: 1013102	Firma 
ORCID: 0000-0002-8810-9005	

## RESUMEN

La industria de arándano en nuestro país ha alcanzado un incremento en los últimos años. Por lo cual, el uso de nuevas tecnologías para el sector agroindustrial se convierte en un complemento para el desarrollo de una producción adecuada. El presente documento propone el diseño de un sistema que indique el estado de madurez del arándano en los arbustos utilizando aprendizaje profundo. El sistema se diseña para ser utilizado en campos de cultivo de arándanos de las localidades costeras del territorio peruano y abarca la concepción de un robot aéreo que podrá navegar dentro del campo de cultivo y registrar los arándanos en los arbustos mediante captura de imágenes, las cuales posteriormente serán analizadas por un algoritmo de identificación para clasificarlas por su estado de madurez.

Para cumplir el objetivo, inicialmente se identificaron los requerimientos del sistema y posteriormente se proponen tres conceptos de solución por medio de la identificación de funciones. Luego de ponderar los tres conceptos de solución y realizar un análisis técnico-económico se selecciona un robot aéreo (“Khallwa”) de material de fibra de carbono y polipropileno expandido que posee una envergadura de 0.8 metros, un largo de 0.53 metros y una masa de 0.55 kilogramos. Una autonomía de vuelo de 10 minutos a una velocidad máxima de 6.2 m/s.

Finalmente, con el objetivo de la identificación del arándano por su estado de madurez realizado se utilizó un modelo de aprendizaje profundo basado en aprendizaje por transferencia, el cual obtuvo una precisión media (mAP) del 92%, lo que conlleva a agilizar el proceso de inspección y evitar errores producidos en el proceso manual.



*Para mi amada esposa Norma, por su paciencia,  
por su comprensión, por su fuerza, por su amor,  
por ser tal y como es.*

*Para mi hija Luna, a quién siempre cuidaré para verla  
hecha una persona capaz y que pueda valerse por sí misma.*

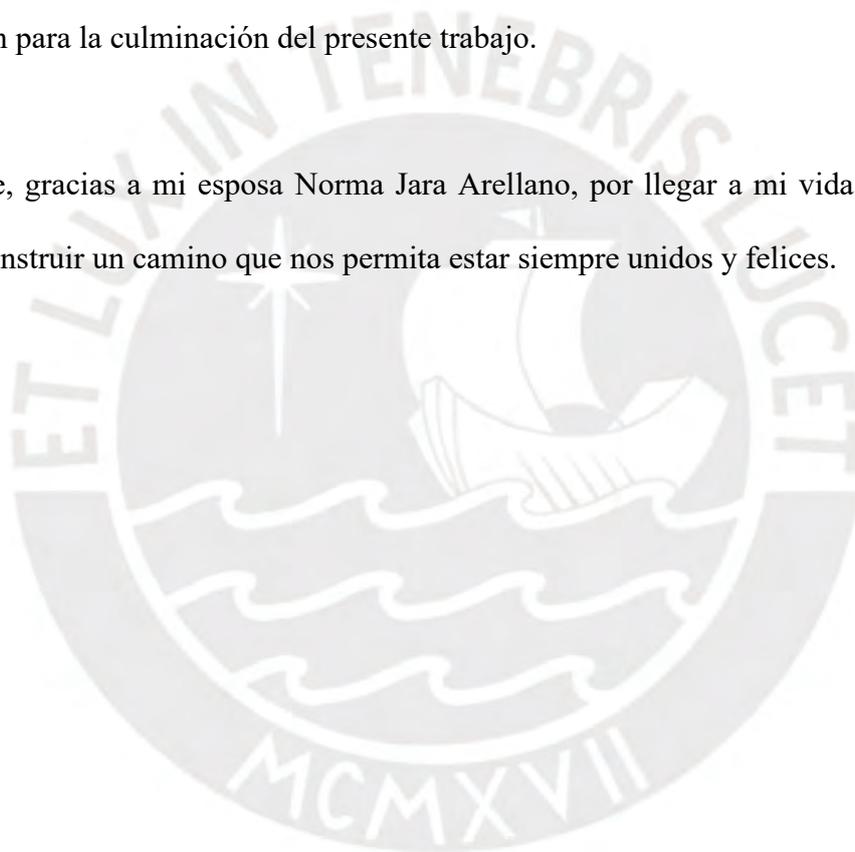
*A mis padres, hermanos y familiares  
por su constante apoyo.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi madre y padre, a mis abuelos y abuelas, a mis tíos y tías, y a mis hermanas y hermano por su total apoyo durante mi etapa universitaria.

A mi asesor Pedro Moisés Crisóstomo Romero por su valiosa guía, paciencia y atenta disposición para la culminación del presente trabajo.

Finalmente, gracias a mi esposa Norma Jara Arellano, por llegar a mi vida y empezar juntos a construir un camino que nos permita estar siempre unidos y felices.



## ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES .....	3
1.1 Problemática .....	3
1.2 Descripción de la propuesta de solución .....	5
1.3 Alcance .....	6
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo General.....	7
1.4.2. Objetivos Específicos .....	7
1.5 Metodología.....	8
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE .....	9
2.1 Marco Tecnológico.....	9
2.1.1. Plataformas robóticas .....	9
2.1.2. Plataformas de registro visual - Cámaras .....	12
2.2 Marco Teórico .....	14
2.2.1. Algoritmo de clasificación de varias clases.....	14
2.2.2. Algoritmo de segmentación por instancias.....	16
CAPÍTULO 3: DISEÑO CONCEPTUAL .....	17
3.1 Requerimientos del sistema .....	17
3.2 Black Box .....	20
3.3 Estructura de funciones .....	22
3.4 Matriz morfológica .....	29
3.5 Conceptos de solución .....	31
3.5.1. Solución 1 .....	31
3.5.2. Solución 2 .....	33
3.5.3. Solución 3 .....	35
3.6 Análisis técnico - económico.....	37
3.6.1. Criterios técnicos .....	37
3.6.2. Criterios económicos .....	38
3.6.3. Resultados de evaluación .....	38
3.7 Solución óptima.....	43
CAPÍTULO 4: DISEÑO INTEGRADO .....	44
4.1 Diseño mecánico.....	46

4.1.1. Cálculos y selección .....	49
4.1.2. Dimensionamiento.....	54
4.1.3. Proceso de fabricación.....	58
4.2 Diseño electrónico/eléctrico .....	59
4.2.1 Módulo de sensores .....	61
4.2.2 Módulo de actuadores.....	66
4.2.3 Controlador de vuelo .....	68
4.2.4 Comunicación.....	71
4.2.5 Suministro de energía .....	72
4.3 Diseño de control.....	73
4.3.1 Integración del sistema de control .....	74
4.3.2 Diagramas de flujo.....	75
CAPÍTULO 5: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	77
5.1 Marcos de implementación.....	77
5.2 Algoritmo de identificación.....	81
5.2.1 Arquitectura de red .....	81
5.2.2 Métricas de evaluación .....	82
5.2.3 Identificación del estado de madurez .....	83
5.2.4 Experimentos y resultados.....	84
CAPÍTULO 6: PLANOS Y COSTOS .....	87
6.1 Diagrama Esquemático.....	87
6.2 Planos Mecánicos .....	88
6.3 Costos .....	89
6.3.1 Costos de diseño .....	90
6.3.2 Costos de fabricación.....	91
CONCLUSIONES.....	94
RECOMENDACIONES .....	96
REFERENCIAS .....	97
ANEXO 1: Lista de requerimientos .....	99
ANEXO 2: Matriz morfológica.....	102
ANEXO 3: Simulaciones .....	105
ANEXO 4: Imágenes de identificación de arándanos .....	107
ANEXO 5: Hojas de datos .....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Tabla comparativa de plataformas robóticas.....	11
Tabla 2.2: Tabla comparativa de plataformas de registro visual - cámaras .....	14
Tabla 3.1: Conceptos de solución para el sistema .....	30
Tabla 3.2: Tabla de criterios y resultados de evaluación.....	42
Tabla 4.1: Tabla de medidas aproximadas de los elementos a utilizar en el robot aéreo.....	48
Tabla 4.2: Tabla de procesos de fabricación o manufactura .....	58
Tabla 4.3: Datos técnicos RunCam Split 3 Micro .....	62
Tabla 4.4: Datos técnicos módulo de potencia Holybro PM02 v3.....	63
Tabla 4.5: Datos técnicos controlador de velocidad electrónico Skywalker ESC 15.....	64
Tabla 4.6: Datos técnicos módulo Pixhawk 4 GPS .....	65
Tabla 4.7: Datos técnicos motor DC sin escobillas Turnigy L2210C-1200.....	67
Tabla 4.8: Datos técnicos servomotor Blue Arrow 3G .....	68
Tabla 4.9: Datos técnicos controlador de vuelo Pixhawk 4 mini .....	70
Tabla 4.10: Datos técnicos módulo JJRC de telemetría Wifi de 2.4G .....	71
Tabla 4.11: Datos técnicos batería de LiPo PULSE 860mAh.....	73
Tabla 5.1: Descripción de las características de la imagen .....	79
Tabla 6.1: Detalle de diagrama esquemático.....	87
Tabla 6.2: Lista de planos mecánicos.....	88
Tabla 6.3: Costo total .....	89
Tabla 6.4: Costos de diseño.....	90
Tabla 6.5: Costos de programación .....	91
Tabla 6.6: Costos de fabricación .....	91
Tabla 6.7: Costos de componentes estandarizados.....	91
Tabla 6.8: Costos de componentes no estandarizados (impresión 3D).....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Perú: Exportaciones agrarias por subpartida nacional, 2021-2022.....	4
Figura 1.2: Esquema complementario a la descripción de la propuesta de solución .....	6
Figura 2.1: DJI Matrice 200 .....	10
Figura 2.2: Imagen de perfil del RoBird .....	10
Figura 2.3: Imagen del robot Thorvald.....	11
Figura 2.4: Imagen de Caddx Tarsier 4K .....	13
Figura 2.5: Imagen de RunCam Split 3 Micro .....	13
Figura 2.6: Resultados de un clasificador KNN aplicado a una imagen de entrenamiento .....	15
Figura 2.7: Ejemplos de segmentación de instancias de arándanos .....	16
Figura 3.1: Black Box.....	20
Figura 3.2: Diagrama de estructura de funciones .....	23
Figura 3.3: Dominio interacción con el usuario .....	23
Figura 3.4: Dominio energía.....	24
Figura 3.5: Dominio sensores.....	25
Figura 3.6: Dominio actuadores .....	26
Figura 3.7: Dominio control .....	27
Figura 3.8: Dominio de visión artificial .....	28
Figura 3.9: Dominio mecánico .....	28
Figura 3.10 Solución 1 .....	32
Figura 3.11 Solución 1 – Ubicación de componentes .....	32
Figura 3.12: Solución 2 .....	34
Figura 3.13: Solución 2 – Ubicación de componentes .....	34
Figura 3.14: Solución 3 .....	36
Figura 3.15: Solución 3 – Ubicación de componentes .....	36
Figura 3.16: Gráfico de comparación de relación de criterios técnicos – económicos ..	42
Figura 3.17: Diseño óptimo (“Khallwa”) .....	43
Figura 4.1: Mapa de vuelo estimado .....	45
Figura 4.2: Diseño 3D (“Khallwa”).....	46
Figura 4.3: Vista superior del robot aéreo .....	47
Figura 4.4: Vista frontal del robot aéreo .....	47
Figura 4.5: Geometría de ala del robot aéreo .....	49
Figura 4.6: Esquema de representación de fuerzas para ángulos de apertura .....	50
Figura 4.7: Esquema de representación de dimensiones para el cálculo del par de fuerza mínimo.....	51
Figura 4.8: Esquema de representación del mecanismo de vuelo. ....	52
Figura 4.9: Esquema de representación de dimensiones para el cálculo del par de fuerza mínimo.....	53
Figura 4.10: Estructura de soporte del robot aéreo en fibra de carbono de 2 mm de espesor .....	55
Figura 4.11: Distintas juntas en ABS empleadas para unir las varillas de fibra carbono. ....	55

Figura 4.12: Articulación de ala en ABS empleadas la estructura de las alas con el mecanismo de vuelo .....	56
Figura 4.13: Fuselaje superior e inferior en espuma de polipropileno expandido (EPP). .....	56
Figura 4.14: Membrana de recubrimiento para alas y cola en espuma de polipropileno expandido (EPP).....	57
Figura 4.15: Fuselaje de cabeza en ABS y esquema de espuma anti-vibración para la cámara.....	57
Figura 4.16: Diagrama de componentes .....	60
Figura 4.17: RunCam Split 3 Micro .....	61
Figura 4.18: Módulo de potencia Holybro PM02 v3 .....	62
Figura 4.19: Controlador de velocidad electrónico Skywalker ESC 15.....	64
Figura 4.20: Módulo Pixhawk 4 GPS.....	65
Figura 4.21: Motor DC sin escobillas Turnigy L2210C-1200 .....	67
Figura 4.22: Servomotor Blue Arrow 3G.....	68
Figura 4.23: Controlador de vuelo Pixhawk 4 mini .....	69
Figura 4.24: Selección del tipo de vehículo aéreo en Mission Planner (izquierda), configuración de ganancias PID en Mission Planner (derecha) .....	70
Figura 4.25: Módulo JJRC de telemetría Wifi de 2.4G.....	71
Figura 4.26: Batería de LiPo PULSE 860mAh .....	73
Figura 4.27: Esquema de comunicación.....	74
Figura 4.28: Diagrama de flujo del programa principal .....	75
Figura 4.29: Diagrama de flujo de la rutina de interrupción .....	76
Figura 5.1: Diagrama del proceso para el Aprendizaje por Transferencia .....	78
Figura 5.2: Imagen tipo del conjunto de datos con la detección del cuadro delimitador .....	79
Figura 5.3: Campo de visión de la cámara del robot aéreo .....	80
Figura 5.4: Diagrama de arquitectura de red Mask RCNN .....	82
Figura 5.5: Figura que detalla la métrica IoU para efectos del algoritmo .....	83
Figura 5.6: Figura de colores predominantes en una imagen general que captura el robot aéreo.....	83
Figura 5.7: Ejemplos de identificación de arándanos.....	84
Figura 5.8: Evolución del entrenamiento del modelo.....	85

## INTRODUCCIÓN

Este estudio presenta el diseño conceptual de un sistema que indique el estado de madurez del arándano en los arbustos, abarcando una revisión del estado actual del arte y una estimación de los costos de fabricación del prototipo. Posteriormente se proporciona una descripción detallada de los desarrollos que serán abordados en cada capítulo.

El primer capítulo definirá la problemática que se investiga, además de delinear los objetivos, la metodología y el alcance del estudio.

El segundo capítulo realizará un estudio sobre el estado actual de la tecnología respecto a plataformas robóticas comerciales aplicadas en los campos de cultivo de arándano, así como dispositivos de registro visual de tamaño reducido. Además, se presentan las propuestas de algoritmos para la identificación del estado de madurez del arándano.

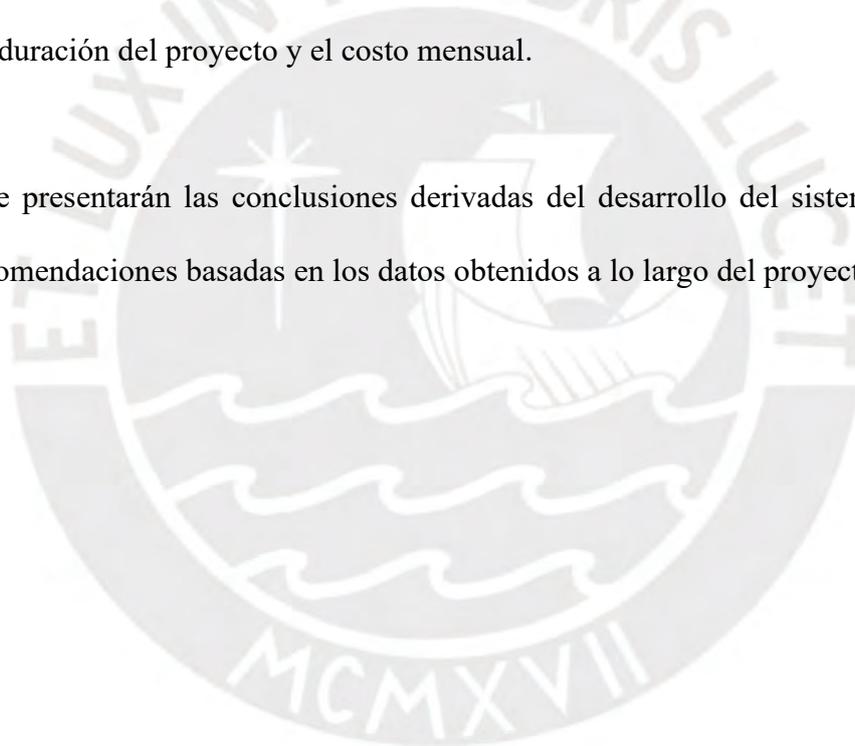
El tercer capítulo describirá los requisitos del sistema y su estructura interna de funciones. Siguiendo la metodología propuesta, se delinearán tres conceptos de solución parcial, cada uno de ellos integrando diversas alternativas para las funciones internas del sistema. Tras un análisis técnico-económico se seleccionará la solución óptima.

El cuarto capítulo presentará y describirá el concepto de solución óptima, incluido el diagrama de funcionamiento del sistema, los componentes mecánicos y los componentes electrónicos integrales de la solución propuesta. Además, introducirá y explicará los diagramas de flujo de control del sistema, detallando la lógica operativa del sistema.

En el quinto capítulo se presentará y describirá el desarrollo del algoritmo de identificación de arándanos, el cual incluye el detalle de las tecnologías actuales en el campo del aprendizaje profundo utilizadas, además de la integración de las diferentes herramientas y entornos utilizados para el desarrollo del mismo.

El sexto capítulo presentará el costo total de la solución propuesta. Incluirá una lista completa de los componentes estandarizados y no estandarizados que constituyen el sistema, junto con sus respectivos valores de compra. Además, el capítulo contabilizará los costos de ingeniería, estimando la duración del proyecto y el costo mensual.

Finalmente se presentarán las conclusiones derivadas del desarrollo del sistema propuesto, junto con recomendaciones basadas en los datos obtenidos a lo largo del proyecto.



## CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

En el presente capítulo se explican los temas relacionados a la problemática actual sobre la identificación de arándanos y la propuesta de solución que se plantea, la cual se desarrollará a través de todo el documento. Como información transversal para el desarrollo del presente trabajo, también se presenta el alcance en conjunto con los objetivos generales y específicos.

### 1.1 Problemática

En la actualidad, nuestro país ha recibido un incremento considerable de aproximadamente de 146% en la exportación de arándanos, como se muestra en la Figura 1.1 (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI] - Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas [DGESEP] - Dirección de Estadística Agraria [DEA], 2022). La importancia que tiene el cultivo de esta fruta en nuestro país es evidente, encontrándose en las primeras posiciones dentro del ranking de exportaciones no tradicionales de los últimos meses (MIDAGRI - DGESEP – DEA, 2022). En este contexto, una mejora en la calidad de producción de los arándanos supondría ventaja competitiva de las empresas peruanas sobre sus competidoras.

**C.74 PERÚ: EXPORTACIONES AGRARIAS POR SUBPARTIDA NACIONAL, 2021-2022**  
(Peso Neto toneladas)

Subpartida nacional	Descripción	Enero - Marzo		Var. %	Marzo		Var. %
		2021	2022r		2021	2022r	
0806100000	Uvas frescas	196 892	235 430	19,6	10 630	17 127	61,1
0901119000	Cafe sin tostar, sin descafeinar, los demas	16 639	67 781	307,4	3 570	14 093	294,7
0804502000	Mangos y mangostanes, frescos o secos	170 967	161 578	-5,5	36 857	40 186	9,0
0810400000	Arandanos rojos, mirtilos y demas frutos del genero vaccinium, frescos	8 671	21 739	150,7	1 344	3 310	146,3
0804400000	Aguacates (paltas) , frescas o secas	49 616	46 780	-5,7	34 020	31 989	-6,0
0811909100	Mango congelado c/azucar (mangifera indica l)	40 179	43 230	7,6	15 573	17 033	9,4
0810909000	Los demas frutas u otros frutos frescos	18 107	25 872	42,9	12 966	16 762	29,3
2309909000	Preparaciones utilizadas para la alimentacion de los animales, demas	38 806	47 955	23,6	17 698	16 805	-5,0
0709200000	Esparragos, frescos o refrigerados	14 587	15 625	7,1	1 859	3 685	98,2
0803901100	Bananas incluidos los platanos tipo "cavendish valery" frescos	53 823	49 604	-7,8	18 524	16 089	-13,1
0904211090	Los demas paprika	5 694	9 228	62,1	2 190	3 554	62,3
1801001900	Los demas cacao en grano, entero o partido, crudo	9 578	10 455	9,2	2 914	4 281	46,9
1511100000	Aceite de palma en bruto	10 651	21 126	98,3	2 920	5 076	73,8
2005991000	Alcachofas (alcauciles)	5 698	9 111	59,9	2 100	3 099	47,6
1008509000	Los demas quinua, excepto para siembra	9 402	12 188	29,6	3 414	4 659	36,5

Figura 1.1: Perú: Exportaciones agrarias por subpartida nacional, 2021-2022

Fuente: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas-Dirección de Estadística Agraria<sup>1</sup>

Los principales indicadores de calidad del arándano asociados con la aceptabilidad del consumidor están relacionados con la apariencia de la fruta y textura (Ministerio de Agricultura y Riego - Dirección General de Políticas Agrarias - Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria, 2016). Esto se debe a que la calidad de un producto es percibida por el consumidor como un conjunto de atributos que son evaluados de forma subjetiva, con el fin de obtener una medida que le permita escoger el mejor.

La identificación del estado de madurez de los arándanos durante la cosecha es realizada mediante un proceso manual lo que puede llevar a identificaciones erróneas (Dirección General de Políticas Agrarias - Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria, 2016). Este proceso convencionalmente ha sido realizado por agricultores o técnicos del agro en la industria que, con la experiencia adquirida durante los años de trabajo, son capaces, de manera visual, de identificar los arándanos por su etapa de crecimiento.

<sup>1</sup> Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego-MIDAGRI - Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas-DGESEP-Dirección de Estadística Agraria-DEA. (mayo de 2022). El agro en cifras.

El arándano, al ser una pequeña fruta fresca, blanda y suave, es susceptible a daños mecánicos posteriores toda vez que durante la cosecha del fruto se haya realizado antes de tiempo o incluso con una fecha posterior a su estado óptimo (Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA], 2017). Esto hace que los arándanos lleguen al mercado en una inadecuada presentación y con estado erróneo de madurez.

Para resolver el problema de identificación errónea del estado de madurez de arándanos durante la cosecha es importante que los procesos de cultivo del fruto sean eficientes; algunos de estos procesos son: aplicación correcta de nutrientes, tratamiento adecuado frente a plagas y seguimiento de la maduración del fruto (Benavides, 2012).

En el presente trabajo de investigación se realizará un estudio del estado de la tecnología relacionada a la identificación del estado de madurez de arándanos en los arbustos utilizando herramientas tecnológicas como visión artificial. De igual manera, se diseñará un sistema que permita circular alrededor de los arbustos previo a la cosecha. Gracias a la adaptabilidad del sistema, se mejorarán el manejo y logística de la cosecha. Este beneficio económico espera motivar la implementación de sistemas automáticos en la agroindustria peruana e indirectamente aumentar la producción de calidad de arándanos peruanos para la exportación.

## **1.2 Descripción de la propuesta de solución**

En el presente trabajo de investigación se diseñará conceptualmente un sistema que permita ingresar en los campos de cultivo y circular alrededor de los arbustos de arándanos para registrarlos de manera visual. Este sistema presentará una alternativa más rápida y económica a los métodos utilizados actualmente; debido a que no se precisará el uso de personal para acceder en las plantaciones. Asimismo, se desarrollará un software de identificación del estado

de madurez utilizando la información de registro visual mediante el entrenamiento de un modelo de aprendizaje profundo. Con ello, acelerará dicho proceso y disminuirá potenciales falla, debido a que el procesamiento de la información lo realizará una computadora.

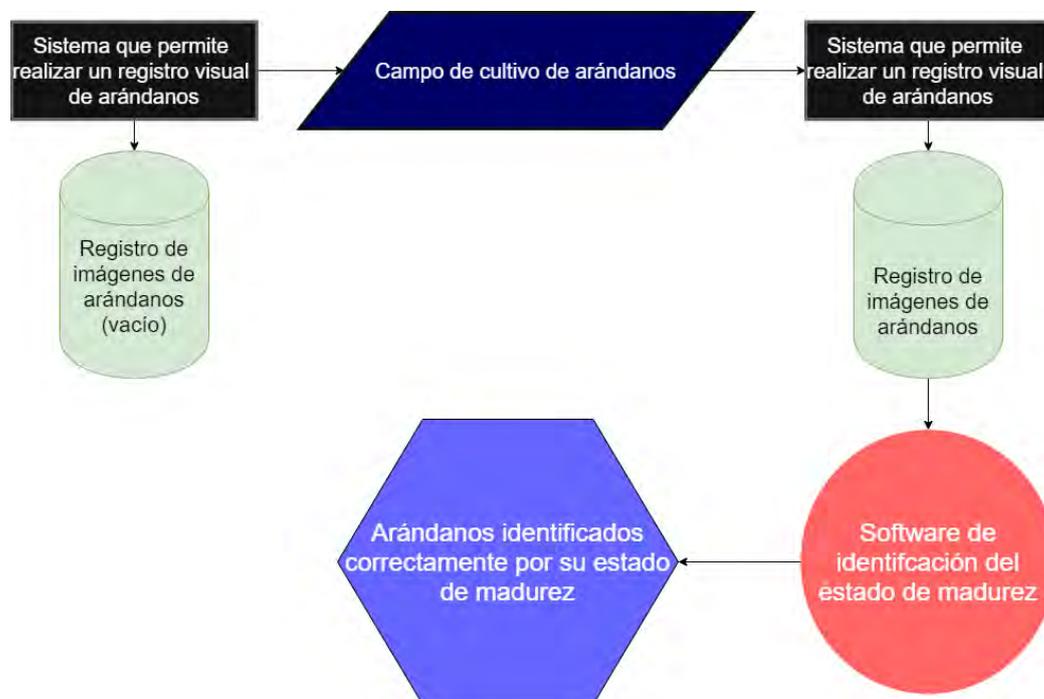


Figura 1.2: Esquema complementario a la descripción de la propuesta de solución

Fuente: Elaboración Propia

### 1.3 Alcance

Se diseñará un sistema móvil que permita ingresar en los campos de cultivo, recorrer un área de aproximadamente de 1 hectárea y con la capacidad de registrar imágenes y/o vídeos de los arándanos en los arbustos por cada ingreso; sin embargo, no se realizará su implementación. La información registrada se utilizará posteriormente para el procesamiento de identificación del estado de madurez de los arándanos mediante el desarrollo de un algoritmo utilizando aprendizaje profundo para el reconocimiento de imágenes. Lo último mencionado conlleva a la definición y diseño de un código de programación.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1. Objetivo General

Diseñar un sistema que navegue sobre campos de cultivo de arándanos para el registro de los frutos en los arbustos mediante captura de imágenes cuyo posterior análisis automático permite identificar el grado de madurez.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar un estudio del estado de la tecnología respecto a sistemas de identificación del estado de madurez de arándanos utilizando aprendizaje profundo.
- Seleccionar un concepto de solución óptimo a partir de la evaluación técnico-económica de tres conceptos obtenidos en base a los requerimientos y funciones que debe cumplir el sistema.
- Elaborar el diseño mecánico del sistema de modo que este cumpla con la función de realizar el recorrido dentro del campo de cultivo.
- Realizar el diseño eléctrico-electrónico seleccionando aquellos sensores, actuadores y componentes que permitan la alimentación y funcionamiento conjunto del sistema.
- Seleccionar el módulo de control y desarrollar la lógica de control adecuada para el tipo de sistema seleccionado que permita monitorear el estado de dicho sistema durante su operación.
- Definir y diseñar el algoritmo de procesamiento de imágenes para la identificación del estado de madurez de los arándanos.
- Realizar la estimación de costos para la fabricación de un prototipo.

## 1.5 Metodología

La realización del objetivo general se guiará por la siguiente metodología de trabajo:

- Se realizará una revisión del estado actual de los sistemas robóticos móviles, dispositivos de registro visual y algoritmos para la identificación del estado de madurez de arándanos.
- Se desarrollará y analizará la estructura de funciones correspondiente a los requerimientos del sistema.
- Se completará una matriz morfológica con soluciones alternativas para cada función identificada, a partir de la cual se propondrán tres diseños conceptuales.
- Se elegirá el diseño óptimo para abordar el problema antes mencionado mediante un análisis técnico-económico de los tres diseños de solución conceptual anteriores.
- Finalmente, se elaborará el diseño mecánico y eléctrico-electrónico del sistema, la selección del módulo de control, y la definición y diseño del algoritmo de identificación del estado de madurez de los arándanos.

## **CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo investigaremos los métodos y/o tecnologías existentes para identificar soluciones que ayuden a lograr el objetivo establecido. Por consiguiente, se analizarán tanto los sistemas robóticos completos como sus componentes individuales, con el fin de asimilar conocimientos que serán de ayuda para la realización del diseño.

### **2.1 Marco Tecnológico**

#### **2.1.1. Plataformas robóticas**

A continuación, se analizarán algunos de los sistemas robóticos más innovadores e importantes.

##### **2.1.1.1 DJI Matrice 200**

El M200 es un cuadracóptero comercial que ha sido adaptado para realizar inspecciones agrarias gracias a la incorporación de un sensor NVDI, el cual cuantifica la vegetación midiendo la diferencia entre el espectro de luz infrarrojo cercano que la vegetación refleja fuertemente y la luz roja que la vegetación absorbe. Se requiere de un operario para poder controlarlo de forma remota y una pantalla remota muestra los datos capturados por el sensor.

Este cuadricóptero tiene un tiempo de vuelo medio (28 minutos) y una máxima velocidad media (60 km/h) (SENERA, 2020).



Figura 2.1: DJI Matrice 200

Fuente: SENTERA<sup>2</sup>

### 2.1.1.2 RoBird

Este ornitóptero comercial permite realizar exploraciones en los campos agrícolas, especialmente utilizado para el control y prevención del cultivo de arándano. Su aplicación radica en sobrevolar el área de cultivo para mantener alejada y controlada la población de aves que pudieran ocasionar daños en la cosecha. Se requiere de un operario para poder controlarlo de forma remota. Este sistema tiene un tiempo de vuelo limitado (25 minutos) y una velocidad máxima alta (80 km/h), esto debido a su peso reducido (800 g) (Clear Flight Solutions, 2020).



Figura 2.2: Imagen de perfil del RoBird

Fuente: Clear Flight Solutions<sup>3</sup>

<sup>2</sup> SENTERA. (s.f.). DJI M200, M210 + AGX710 Gimbaled Ag Sensor (Drone + Sensor). Obtenido de <https://sentera.com/product/dji-m200-agx710-upgrade/>

<sup>3</sup> Clear Flight Solutions. (s.f.). ROBIRD®. Obtenido de <https://www.robird.com/>

### 2.1.1.3 Thorvald

Thorvald es un robot modular móvil que ofrece servicios agrícolas basado en módulos que permite construir robots muy diferentes utilizando los mismos módulos básicos y reconstruirlos utilizando solo herramientas manuales básicas. Los módulos están diseñados para permitir robots de alta calidad que se pueden personalizar rápidamente para una aplicación determinada en un entorno determinado, como un invernadero, túnel, campo abierto y huerto. Posee una velocidad máxima baja (5.4 km/h), esto debido a su peso (180 kg) (SAGA Robotics, 2020).



Figura 2.3: Imagen del robot Thorvald

Fuente: SAGA Robotics<sup>4</sup>

### 2.1.1.4 Comparación de plataformas robóticas

Tabla 2.1: Tabla comparativa de plataformas robóticas

Datos Técnicos	DJI Matrice 200	RoBird	Thorvald
Modo de desplazamiento	Vuelo	Vuelo	Terrestre
Velocidad máxima	60 km/h	80 km/h	5.4 km/h
Peso máximo	4.53 kg	0.8 kg	180 kg
Tiempo de desplazamiento	28 min	25 min	600 min
Tamaño	887×880×378 mm	1000×390×250 mm	3000×1750×825 mm
Cámara	AGX710 Gimbaled	Se puede incluir hasta una cámara	Se puede incluir hasta una cámara

Fuente: Elaboración Propia con información de las plataformas robóticas descritas anteriormente

<sup>4</sup> SAGA Robotics. (s.f.). Thorvald. Obtenido de <https://sagarobotics.com/pages/thorvald-platform>

La Tabla 2.1 resume las características antes mencionadas y proporciona una comparación general entre los VANT (vehículo aéreo no tripulado) utilizados para registro visual o navegación en campos de cultivo y el robot terrestre utilizado para aplicaciones en la agroindustria. Destaca la superioridad de los drones en términos de velocidad, peso y tamaño, atributos asociados principalmente a sus capacidades de vuelo. Se espera que la inversión en estas aeronaves aumente en los próximos años, lo que hace que la innovación en aplicaciones y nuevos diseños sea muy ventajosa para el futuro de la agroindustria.

### **2.1.2. Plataformas de registro visual - Cámaras**

Las cámaras son elementos fundamentales en sistemas robóticos que realicen un registro visual, pues le brindan la capacidad de registrar imágenes y/o videos de su entorno, que se procesará y finalmente realizar las acciones que se requieran. Los avances en esta tecnología han permitido disminuir el tamaño y peso de estas cámaras facilitándoles su integración en múltiples aplicaciones robóticas. A continuación, se mostrará el estado del arte de los tipos de cámara de mayor utilidad para el desarrollo de la propuesta.

#### **2.1.2.1 Caddx Tarsier 4K**

Esta cámara de alta resolución es una de las más compactas y livianas de su tipo (18g). Su dimensión reducida (16×19x20 mm) permite ahorrar espacio y su bajo peso posibilita alargar la batería del robot que la lleve, pues se disminuye la energía necesaria para desplazar su masa. Tiene una disposición de dos cámaras, lo que le permite una captura de imagen con menor ruido (CADDXFPV, 2020).



Figura 2.4: Imagen de Caddx Tarsier 4K

Fuente: CADDXFPV<sup>5</sup>

### 2.1.2.2 RunCam Split 3 Micro

Esta micro cámara permite capturar imágenes y/o videos a una alta tasa de cuadros por segundo (60 Hz); lo cual aumenta la velocidad de movimiento con que se puede grabar sin que las imágenes capturadas se vean distorsionadas por el desenfoco de movimiento. Su peso reducido (13.5 g) alargará el tiempo de vida de la batería del robot que lo desplace (RunCam, 2020).



Figura 2.5: Imagen de RunCam Split 3 Micro

Fuente: RunCam<sup>6</sup>

<sup>5</sup> CADDXFPV. (s.f.). Caddx Tarsier V2. Obtenido de <https://caddxfpv.com/collections/fpv-hd-equipment/products/caddx-tarsier>

<sup>6</sup> RunCAM. (s.f.). RunCam Split 3 Micro. Obtenido de <https://shop.runcam.com/runcam-split-3-micro-and-split-3-nano/>

### 2.1.2.3 Comparación de plataformas de registro visual - cámaras

Tabla 2.2: Tabla comparativa de plataformas de registro visual - cámaras

Datos Técnicos	Caddx Tarsier 4K	RunCam Split 3 Micro
Resolución óptica	4K / 1080p	1080p
Cuadros por segundo	30 / 60 fps	60 fps
Fuente de alimentación	5 – 12 VDC	5 – 20 VDC
Tamaño	16×19×20 mm	19×20×19 mm
Peso	18 g	13.5 g
Interfaz de montaje	Montura plástica estándar para base	Montura plástica estándar para base

Fuente: Elaboración Propia con información de las plataformas de registro visual descritas anteriormente

La Tabla 2.2 resume las características mencionadas previamente y realiza una comparación general entre las cámaras utilizadas en aplicaciones robóticas. Se distingue que ambas poseen características similares como la resolución óptica y cuadros por segundo. Lo más resaltante es el peso y su integración a la aplicación robótica debido a su dimensión.

## 2.2 Marco Teórico

La aplicación de técnicas de visión artificial para el análisis de los alimentos ha aumentado considerablemente en los últimos años. La diversidad de las aplicaciones depende, entre otras cosas, del hecho de que los sistemas de visión artificial proporcionan información sustancial acerca de la naturaleza y los atributos de los objetos presentes en una escena.

### 2.2.1. Algoritmo de clasificación de varias clases.

El algoritmo de clasificación de varias clases ha sido utilizado para identificar el arándano en diferentes etapas de crecimiento utilizando imágenes en color RGB adquiridas al aire libre con una cámara digital normal. Para validar la eficiencia de este método se compararon los

resultados obtenidos de diferentes clasificadores y si eligió un clasificador con el mejor rendimiento para usar en el arándano (Li, Suk Lee y Wang, 2014).

El algoritmo de clasificador propuesto utilizó KNN para clasificación supervisada, este algoritmo presenta ventajas para encontrar similitudes en datos y poniendo un conjunto de datos similar en varios grupos, pero también utilizado la información de la clase objetivo para la clasificación supervisada, entonces puede asignar una etiqueta de clase a cada uno de los grupos. Los resultados del análisis estadístico indicaron que el clasificador KNN produjo una precisión promedio que oscila entre 85% y 86% para fruta y separación de fondo, y una precisión promedio que varía del 90% al 98% para la separación de frutos en etapas de crecimiento maduras, casi maduras, casi jóvenes y jóvenes (Li et al., 2014).

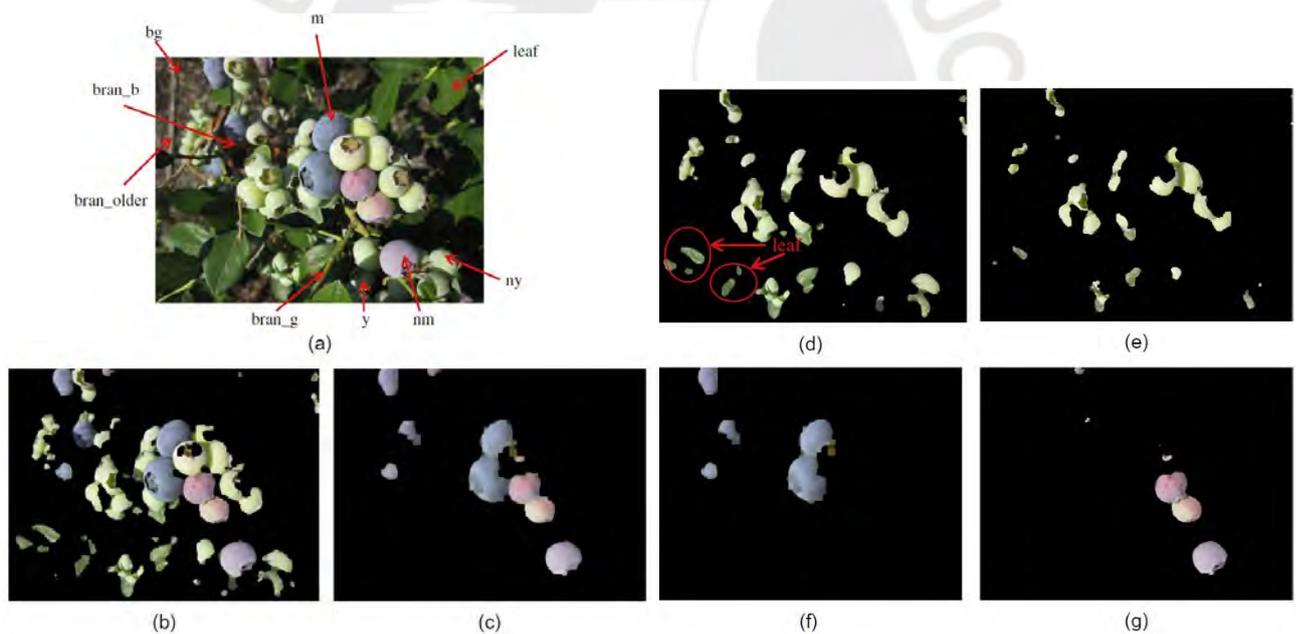


Figura 2.6: Resultados de un clasificador KNN aplicado a una imagen de entrenamiento: (a) imagen original, (b) fruta separada del fondo, (c) fruta madura y casi madura, (d) casi joven y fruta joven con algunas hojas, (e) fruta casi joven y joven después de filtrar las hojas, (f) fruta madura solamente, y (g) fruta casi madura solamente.

Fuente: Li H., Suk Lee W., Wang K.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Li H., Suk Lee W., Wang K. (mayo de 2014). Identifying blueberry fruit of different growth stages using natural outdoor color images

### 2.2.2. Algoritmo de segmentación por instancias.

El algoritmo de segmentación por instancias se ha utilizado para la cuantificación de arándanos basada en el Mask R-CNN. Este algoritmo ha sido entrenado desde cero usando una base de datos obtenida utilizando la cámara de un celular de gama media en una granja comercial de arándanos en Los Ángeles, Chile. Todas las imágenes presentan condiciones desafiantes de iluminación, oclusiones parciales y completas, variaciones en brillo, contraste, sombras y también objetos externos como personas, manos y hojas (Gonzales, Arellano y Tapia, 2019).

El algoritmo de máscara R-CNN se implementó usando tres redes principales diferentes: ResNet101, ResNet50 y MobileNetV1. Se realizaron varios experimentos en orden para seleccionar los mejores hiper parámetros de cada modelo implementado. ResNet 50 tiene un número menor de capas que ayuda a evitar el exceso de sobreajuste (overfitting) dado el pequeño número de imágenes en la base de datos. Una implementación más profunda, requiere en general, una mayor cantidad de imágenes en la base de datos de entrenamiento para evitar estos problemas. Para la segmentación por instancia, los mejores puntajes para la precisión fueron 0.909 y 0.774 para umbrales de 0.5 y 0.7 respectivamente (Gonzales et al., 2019).



Figura 2.7: Ejemplos de segmentación de instancias de arándanos. La imagen original se muestra a la izquierda, la segmentación manual al centro y los arándanos segmentados resultantes a la derecha. El número de arándanos cuantificados automáticamente se muestra en la esquina inferior derecha de cada imagen.

Fuente: Gonzales S., Arellano C., Tapia J.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Gonzales S., Arellano C., Tapia J. (agosto de 2019). Deepblueberry: Quantification of Blueberries in the Wild Using Instance Segmentation

## **CAPÍTULO 3: DISEÑO CONCEPTUAL**

Este capítulo detalla el diseño del concepto final del sistema. Para alcanzar este objetivo se definen inicialmente los requerimientos, black box y la estructura de funciones del sistema. Para cada función se presentan como hasta tres soportes de solución. El capítulo finaliza con un análisis técnico-económico de las soluciones, combinando las alternativas de solución para cada función del sistema.

### **3.1 Requerimientos del sistema**

El sistema necesita de ciertos requerimientos (Ver Anexo 1) demandados por el cliente y las necesidades del sistema mismo. Con el fin de cumplir con el objetivo general, se requiere de un sistema que permita ingresar en los campos de cultivo para que pueda registrar los arándanos en los arbustos, que incluye el posterior proceso de identificación del estado madurez y con ello reducir el error de identificación visual.

A continuación, se detallan los requerimientos más importantes:

#### A. Función Principal:

La función principal del sistema es navegar a los campos de cultivo y capturar imágenes y/o videos de arándanos en los arbustos que posteriormente se procesarán para identificar el estado de madurez de los mismos.

#### B. Geometría:

En el diseño mecánico del sistema se debe tomar en cuenta que este no debe ocupar un volumen mayor a 1500 x 1500 x 500 mm, esto para que pueda trasladarse a través de los surcos. La distancia entre cada surco de los campos de cultivo de arándano es de 3500 mm (Benavides, 2012).

#### C. Cinemática:

Para la cinemática del sistema se requiere que su velocidad mínima de operación sea de 2 m/s (7.2 km/h), que corresponde para el recorrido de 1000 m.

#### D. Fuerzas:

La estructura debe soportar su propio peso y además debe soportar las fuerzas mecánicas producidas por su movimiento. El peso máximo total será de 35 N que corresponde un valor menor al peso máximo (250 N) que puede manipular una persona según la Norma Básica de Ergonomía RM 375 (Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, 2008).

#### E. Energía:

El sistema debe contar con una fuente de energía recargable con una autonomía de 10 minutos, que es el tiempo promedio de los sistemas autónomos en el mercado. Además, su fuente de energía recargable (batería) se deberá recargar con un suministro eléctrico de 220 VAC y 60 Hz.

#### F. Electrónica:

El sistema debe usar un control digital para la ejecución de las acciones de actuadores y también para la lectura de las señales de entrada a ejecutar (sensores y datos de entrada). Asimismo, deberá contar como mínimo un sensor que permita cumplir con la función de captura de imágenes y/o videos.

#### G. Software:

Se desarrollará, mediante el uso de un software de código abierto, un algoritmo de identificación del estado de madurez de los arándanos utilizando la característica del color.

#### H. Señales:

El sistema incluirá las señales de encendido y apagado. Así como de entrada (input) de trayectoria, inicio y/o parada y la posibilidad de operación manual. Las señales de salida (output), la velocidad de desplazamiento, la energía restante y el tiempo recorrido. Adicionalmente, se contará con una señal de inicio y detención de captura de imagen la cual interactúa con el sensor que permite realizar el registro visual para utilizar dicha información posteriormente y entregar imágenes procesadas. Tanto las señales de entrada como las de salida serán ingresadas y visualizadas respectivamente en una laptop o PC que contará con una interfaz desde la cual un operario pueda controlar la trayectoria del sistema, así como la operación manual del mismo.

#### I. Fabricación:

Los materiales que se utilizarán para la construcción del sistema será del tipo ligero, pero altamente resistente a esfuerzos y deformaciones. Asimismo, el sistema debido al ambiente donde funcionará, este puede incluir factores ambientales desfavorables como polvo y humedad. Por lo tanto, se utilizará un Índice de Protección (IP-20) (International Electrotechnical Commission, 1998).

#### J. Uso:

El funcionamiento en general óptimo bajo condiciones ambientales de la costa (altura máxima 1000 m.s.n.m. con temperatura normal de 18°C a 25°C y humedad de 90%).

La interacción entre el sistema y el usuario se da gracias a la interfaz.

#### K. Plazos:

El diseño conceptual incluirá un tiempo de desarrollo de 3 meses y el diseño integrado 3 meses adicionales.

### 3.2 Black Box

El presente diagrama (Figura 3.1) permite distinguir de una forma más clara los elementos de entrada (Inputs) y los elementos de salida (Outputs) para la interfaz del usuario final. Esto permitirá desarrollar de una forma más dinámica y práctica el funcionamiento completo del sistema.

A continuación, se mostrará las entradas y salidas del sistema de identificación del estado de madurez de arándanos en los arbustos utilizando aprendizaje profundo y su caja negra.



Figura 3.1: Black Box (Fuente: Elaboración propia)

#### A. Entradas:

- Ambiente (campo de cultivo de arándanos):

Corresponde a los arándanos ubicados en los arbustos en el campo de cultivo en el cual el sistema móvil recorrerá y realizará las capturas de imágenes y/o vídeos.

- Energía eléctrica monofásica de 220 VAC 60 Hz:

Alimentación de energía eléctrica del sistema.

- Encendido / Apagado:

Señal que permite el encendido o apagado del sistema, corresponde fundamentalmente para habilitar la energización del sistema.

- Trayectoria de desplazamiento:

Señal que contiene la trayectoria a realizar el sistema mediante el uso de la interfaz.

- Inicio / Parada:

Señal que permite el inicio o parada correspondiente a la acción de recorrido realizada por el sistema en el campo de cultivo.

- Operación manual:

Señal que contiene las indicaciones de desplazamiento realizados de forma manual por medio de la interfaz.

- Inicio / Parada de captura de imágenes y/o vídeos:

Señal que permite el inicio o parada correspondiente a la acción de captura de imágenes y/o vídeos realizada por el dispositivo correspondiente.

#### B. Salidas:

- Imágenes y/o vídeos para procesamiento:

Corresponde a la colección de imágenes y/o videos capturados por el sistema. La información recolectada será procesada mediante el uso del software de identificación del estado de madurez de los arándanos.

- Velocidad de desplazamiento:

Señal que indica la velocidad de desplazamiento del sistema mientras realiza el recorrido en el campo de cultivo.

- Tiempo transcurrido desde el inicio:

Señal que indica el tiempo de recorrido transcurrido desde el inicio del desplazamiento del sistema en el campo de cultivo.

- Energía restante:

Señal que indica la energía eléctrica almacenada en el sistema como porcentaje respecto a su capacidad total de almacenamiento.

- Vibración – Ruido – Calor:

Sonidos producidos debido al funcionamiento del sistema, así como el calor producido por el mismo.

### **3.3 Estructura de funciones**

Para definir las funciones del sistema se realiza un análisis inicial de acuerdo a la lista de requerimientos planteada anteriormente. Posteriormente se presentan las funciones del sistema y sus interacciones entre las entradas y salidas, estableciendo los dominios que se incluirán en la estructura de funciones.

La estructura detallada y las interconexiones entre funciones se presentan a continuación:

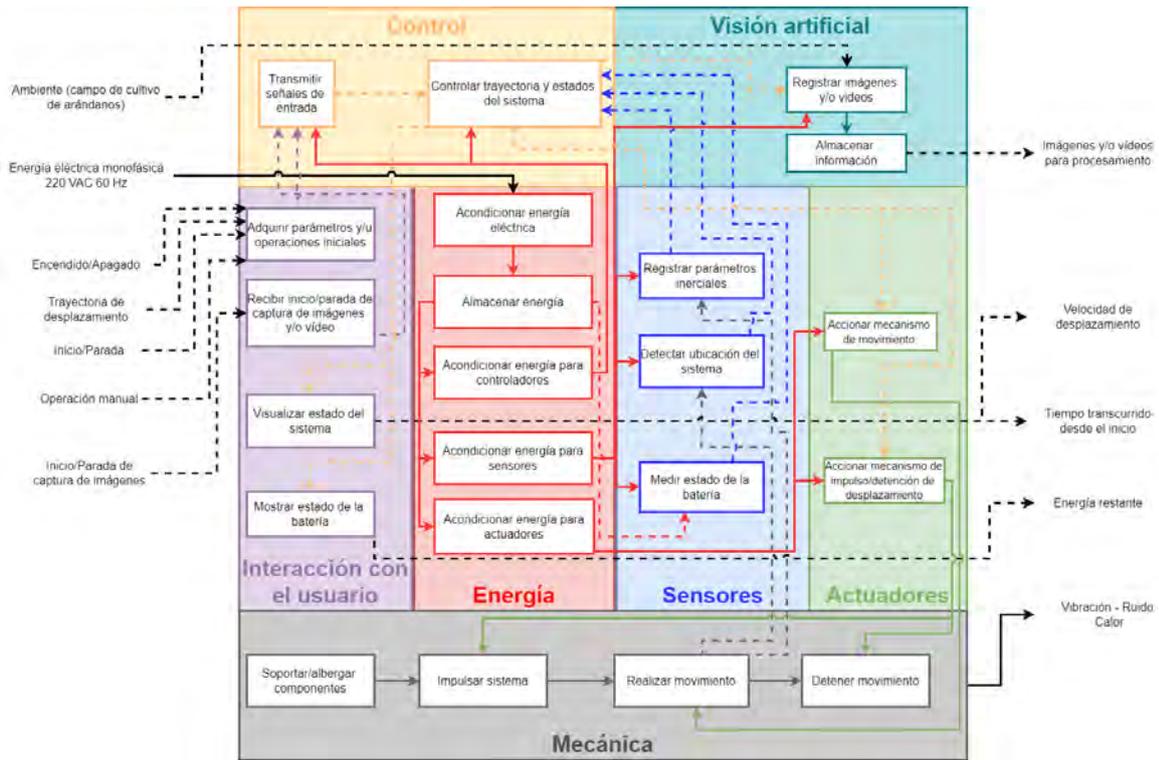


Figura 3.2: Diagrama de estructura de funciones (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se presentan las funciones de la estructura del sistema divididas en dominios según la relación que guardan:

A. Dominio interacción con el usuario:

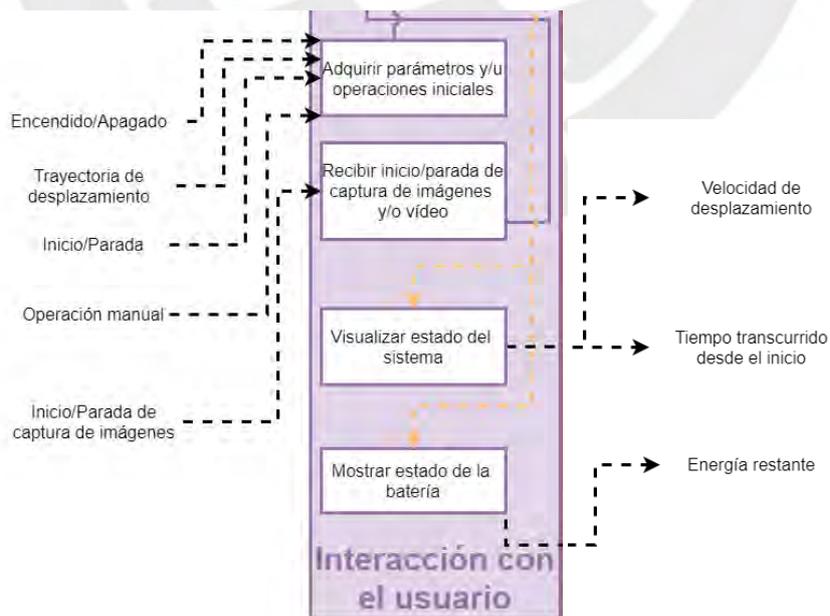


Figura 3.3: Dominio interacción con el usuario (Fuente: Elaboración propia)

- Adquirir parámetros y/u operaciones iniciales:

Ingresar las señales de entrada (Encendido/Apagado, Trayectoria, Inicio/Parada, Operación manual) del sistema mediante la interacción física del usuario en una interfaz. Las señales adquiridas son enviadas al dominio de control.

- Recibir inicio/parada de captura de imágenes y/o videos:

Ingresar la solicitud de inicio/parada de captura de imágenes y/o videos del sistema mediante la interacción física del usuario en una interfaz.

- Visualizar estado del sistema:

Permitir visualizar el estado de las señales de velocidad de desplazamiento y tiempo transcurrido mediante una interfaz hacia el usuario.

- Mostrar estado de la batería:

Permitir visualizar el estado de la batería mediante una interfaz hacia el usuario.

#### B. Dominio energía:

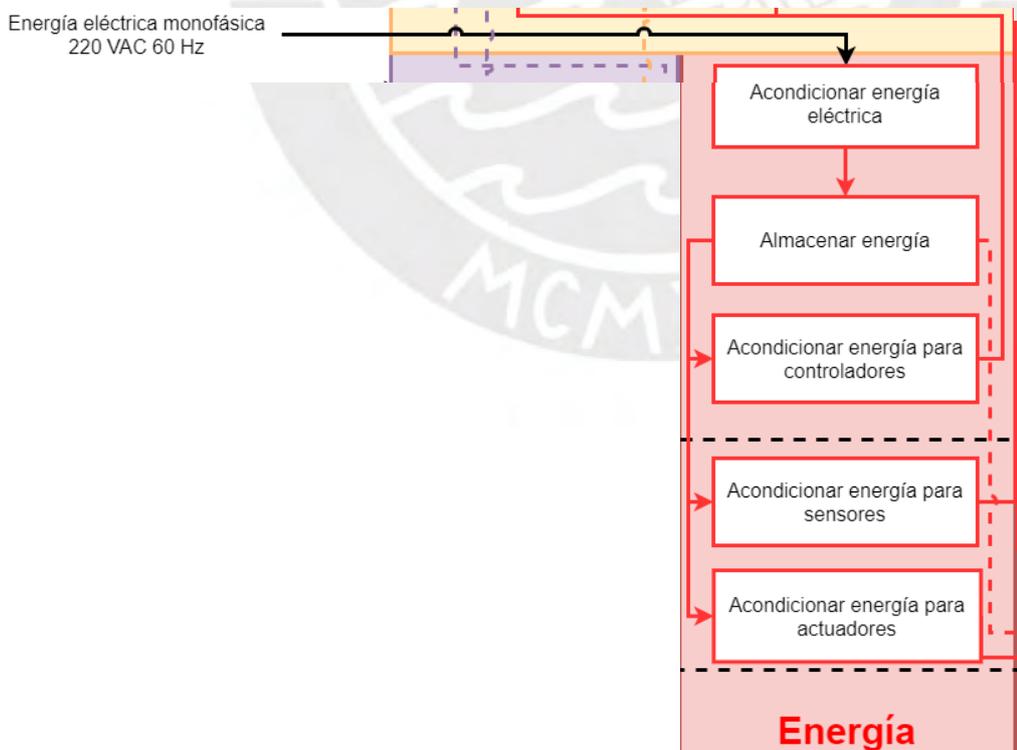


Figura 3.4: Dominio energía (Fuente: Elaboración propia)

- Acondicionar energía eléctrica:

Recibe la señal eléctrica de 220 VAC a 60 Hz y la transforma en la energía según el requerimiento de los controladores, actuadores y sensores.

- Almacenar energía:

Acumular la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los controladores, actuadores y sensores.

- Acondicionar energía para controladores, actuadores y sensores:

Acondicionar la energía eléctrica obtenida por el dispositivo de almacenamiento a una energía óptima de salida que será usada por los diferentes elementos del sistema (controladores, actuadores y sensores).

### C. Dominio sensores:

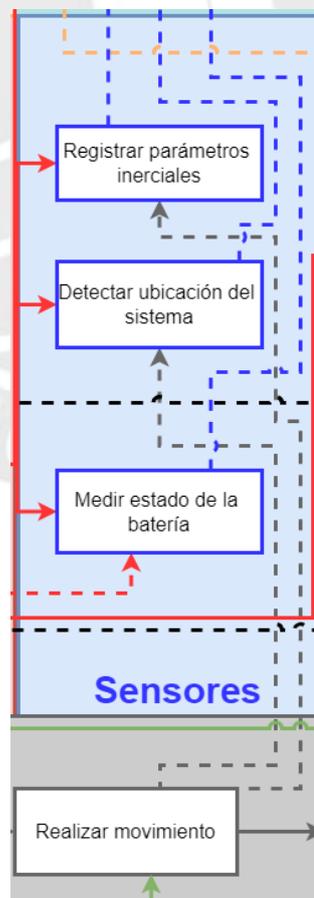


Figura 3.5: Dominio sensores (Fuente: Elaboración propia)

- Registrar parámetros inerciales:

Permite registrar la orientación y posición del sistema al inicio, durante y final de su trayectoria para mantener un movimiento uniforme y preciso en su control, mantiene informado al controlador principal.

- Detectar ubicación del sistema:

Permite detectar la ubicación del sistema durante su trayectoria para mantener un movimiento uniforme y preciso en su control, mantiene informado al controlador principal.

- Medir estado de la batería:

Permite medir el estado de la batería del sistema al inicio y durante su desplazamiento, mantiene informado al controlador principal.

#### D. Dominio actuadores

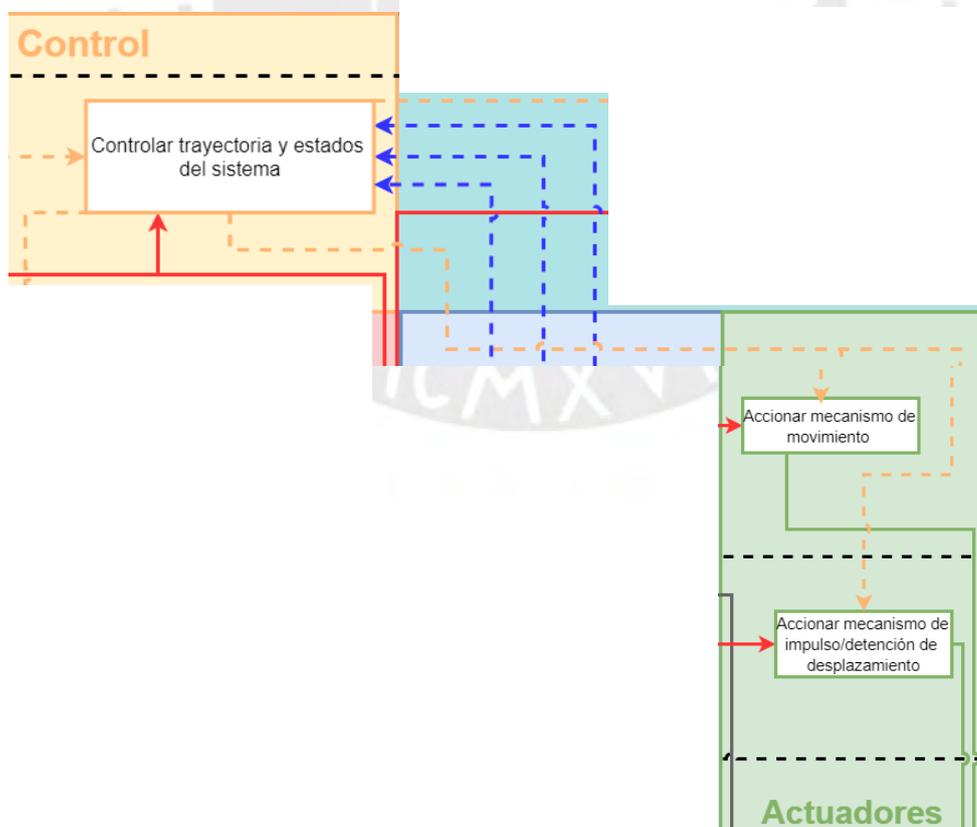


Figura 3.6: Dominio actuadores (Fuente: Elaboración propia)

- Accionar mecanismo de movimiento:

Permite accionar el mecanismo de movimiento del sistema para realizar su desplazamiento en la trayectoria indicada, tiene como entrada la energía eléctrica acondicionada y la señal del sistema de control con los datos del movimiento a realizar.

- Accionar mecanismo de inicio/detención de desplazamiento:

Permite accionar el mecanismo de inicio/detención de desplazamiento del sistema para realizar el inicio o detención del movimiento que será realizado seguidamente de esta acción, tiene como entrada la energía eléctrica acondicionada y la señal del sistema de control con los datos de la acción a realizar.

#### E. Dominio Control:

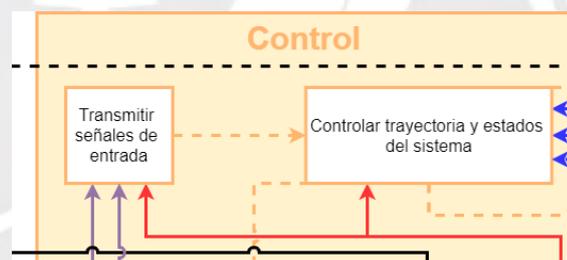


Figura 3.7: Dominio control (Fuente: Elaboración propia)

- Transmitir señales de entrada:

Transmite la información de las señales de entrada recibidas hacia el controlador principal a través de un protocolo de comunicación.

- Controlar trayectoria y estados del sistema:

Permite recibir y procesar datos de entrada y de sensores; controlar la captura de imágenes y/o vídeos, controlar actuadores y enviar información de salida. Para el control del movimiento del sistema en general, se realizará mediante un control de lazo cerrado, donde la referencia del sistema será dada por el dato de entrada que es la trayectoria y se compara con el dato de medición de la ubicación del sistema.

## F. Dominio visión artificial

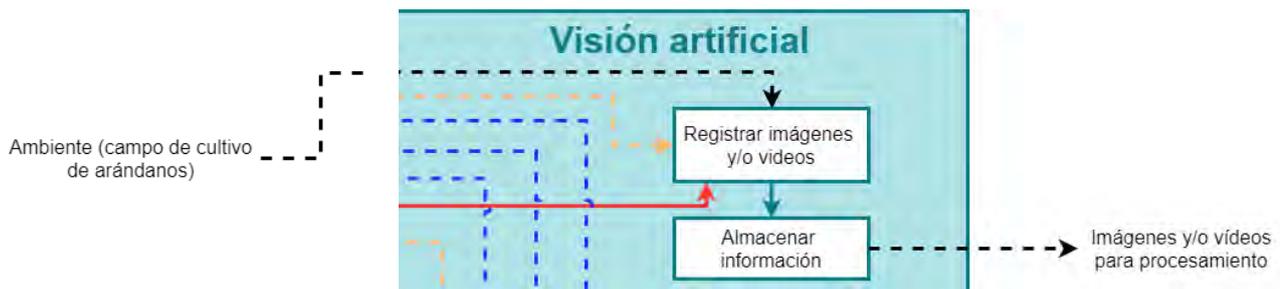


Figura 3.8: Dominio de visión artificial (Fuente: Elaboración propia)

- Registrar imágenes y/o videos:

Permite registrar las imágenes y/o videos adquiridas a través del ambiente (campo de cultivo de arándanos), tiene como entrada la energía eléctrica acondicionada y la señal del sistema de control para indicar el inicio/detención.

- Almacenar información:

Permite almacenar la información registrada anteriormente mediante un dispositivo de almacenamiento de datos. La salida de esta función corresponde a las imágenes y/o videos para procesamiento. Ello implica el uso de esta información para la identificación del estado de madurez de los arándanos mediante el uso del algoritmo ejecutado en una plataforma computacional (PC o Laptop).

## G. Dominio mecánico

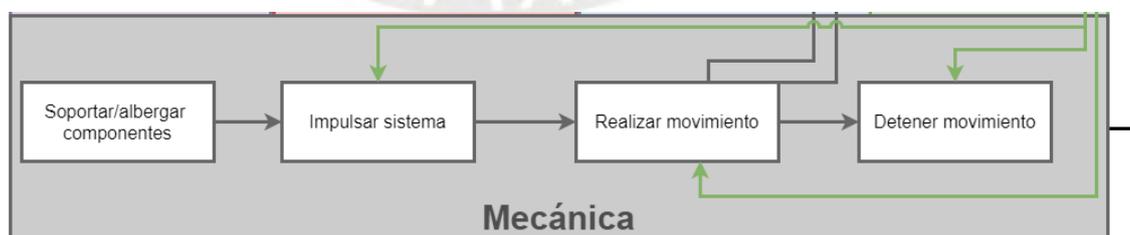


Figura 3.9: Dominio mecánico (Fuente: Elaboración propia)

- Soportar/albergar componentes:

Permitir llevar consigo los diferentes elementos del sistema, tales como mecanismos, controladores, actuadores y sensores. A partir de la ubicación de lo mencionado se faculta las posteriores funciones del presente dominio.

- Ejecutar inicio de movimiento:

Iniciar las acciones que permiten dar con el inicio del desplazamiento del sistema. Estas acciones se ejecutan por medio de los mecanismos que están conectados a un actuador.

- Realizar movimiento:

Iniciar las acciones que permiten el desplazamiento del sistema en la trayectoria recibida y procesada por el controlador principal. Se realiza el movimiento de traslación por medio de los mecanismos que están conectados a un actuador.

- Ejecutar detención de movimiento:

Iniciar las acciones que permiten dar con la detención del desplazamiento del sistema. Estas acciones se ejecutan por medio de los mecanismos que están conectados a un actuador.

### **3.4 Matriz morfológica**

En esta sección se presenta la matriz morfológica del proyecto, donde en base a la investigación realizada del estado del arte, se proponen las tecnologías, conceptos y diseños que podrían ser utilizados para las funciones descritas anteriormente. La matriz morfológica con las alternativas propuestas se presenta en el Anexo 2.

Se obtuvieron los siguientes 3 conceptos de solución como resultado de combinar alternativas para cada función del sistema. Ver Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Conceptos de solución para el sistema

Dominio	Función	Concepto 1 	Concepto 2 	Concepto 3 
Mecánico	Soportar / albergar componentes	Fuselaje planar	Fuselaje tubular	Fuselaje tubular
	Impulsar / detener movimiento	Propelas hélice (giro)	Alas (aleteo)	Propelas hélice (giro)
	Realizar movimiento	Configuración de rotores simétricos con propelas	Configuración de alas + cola	Configuración de ala volante
Energía	Acondicionar energía eléctrica	Cargador de batería		
	Almacenar energía	Batería LiPo	Batería LiPo	Batería NiMH
	Acondicionar energía para controladores, actuadores y sensores	Drivers	Regulador de voltaje conmutado	Regulador de voltaje conmutado
Sensores	Medir estado de la batería	Sensor de voltaje	Sensor de voltaje y corriente	Sensor de corriente
	Detectar ubicación del sistema	Módulo GPS		
	Registrar parámetros inerciales	Unidad de medición inercial externa	Sistema de medición inercial en controlador de vuelo	Unidad de medición inercial externa
Actuadores	Accionar mecanismo de movimiento	Motor DC	Servomotor	Motor paso a paso
	Accionar mecanismo de impulso / detención de desplazamiento	Motor DC	Motor DC	Motorreductor DC
Interacción con el usuario		Interfaz en Laptop	Interfaz en Laptop	Interfaz en Tablet
Control	Transmitir señales de entrada	Módulo RF	Módulo Wi-Fi	Módulo 4G
	Controlar trayectoria y estados del sistema (hardware)	Microcontrolador + controlador de velocidad electrónico (ESC)	Controlador de vuelo + controlador de velocidad electrónico (ESC)	Computador de placa reducida + controlador de velocidad electrónico (ESC)
	Controlar trayectoria y estados del sistema (software)	Control On/Off	Control PID	Control On/Off
Visión artificial	Registrar imágenes y/o videos	Micro cámaras de alta resolución	Micro cámaras de alta resolución	Cámaras para visión artificial
	Almacenar información	Dispositivo de almacenamiento USB	Tarjeta de almacenamiento SD	Conexión en la nube

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5 Conceptos de solución

Para cada solución trazada en la matriz morfológica se realiza un bosquejo detallando dimensiones aproximadas y el portador de solución seleccionado. A continuación, se explica cada concepto de solución y una imagen general del bosquejo.

#### 3.5.1. Solución 1

El primer concepto (Figura 3.10) plantea el desplazamiento del sistema mediante el giro de hélices accionadas por rotores (motores DC). Se utiliza cuatro rotores equidistantes, lo cual lo asemeja a un cuadricóptero. El desplazamiento en el plano se realiza mediante la diferencia de velocidad entre par de rotores y la elevación de acuerdo a la velocidad del conjunto. Asimismo, presenta una estructura de soporte entre cada rotor.

Los controladores, actuadores, sensores y la batería de alimentación de tipo LiPo se encuentran dentro de la estructura de soporte plano, ubicados de tal manera que exista una distribución en el peso de toda esa estructura (Figura 3.11). La parte superior de la estructura es removible lo que permite acceder a todos los componentes. El control de trayectoria lo realiza un microcontrolador mediante los parámetros adquiridos de la unidad de medición inercial y el GPS. Por otro lado, la interfaz es ejecutada en una plataforma computacional (PC o laptop) y la comunicación se realiza mediante un módulo de radiofrecuencia.

Dispone de una cámara que permite el registro de la información visual recolectada cuando el sistema se encuentre navegando en el campo de cultivo de arándanos. Esta cámara tiene la capacidad de poder girar 360°, la cual se encuentra ubicada en la parte inferior de la estructura de soporte y acoplada a la misma mediante un soporte. La información recolectada se encuentra almacenada en un dispositivo USB que se encuentra en la parte posterior de la estructura, el

cual es retirado cuando termine su ciclo de operación y utilizar la información registrada para su procesamiento.

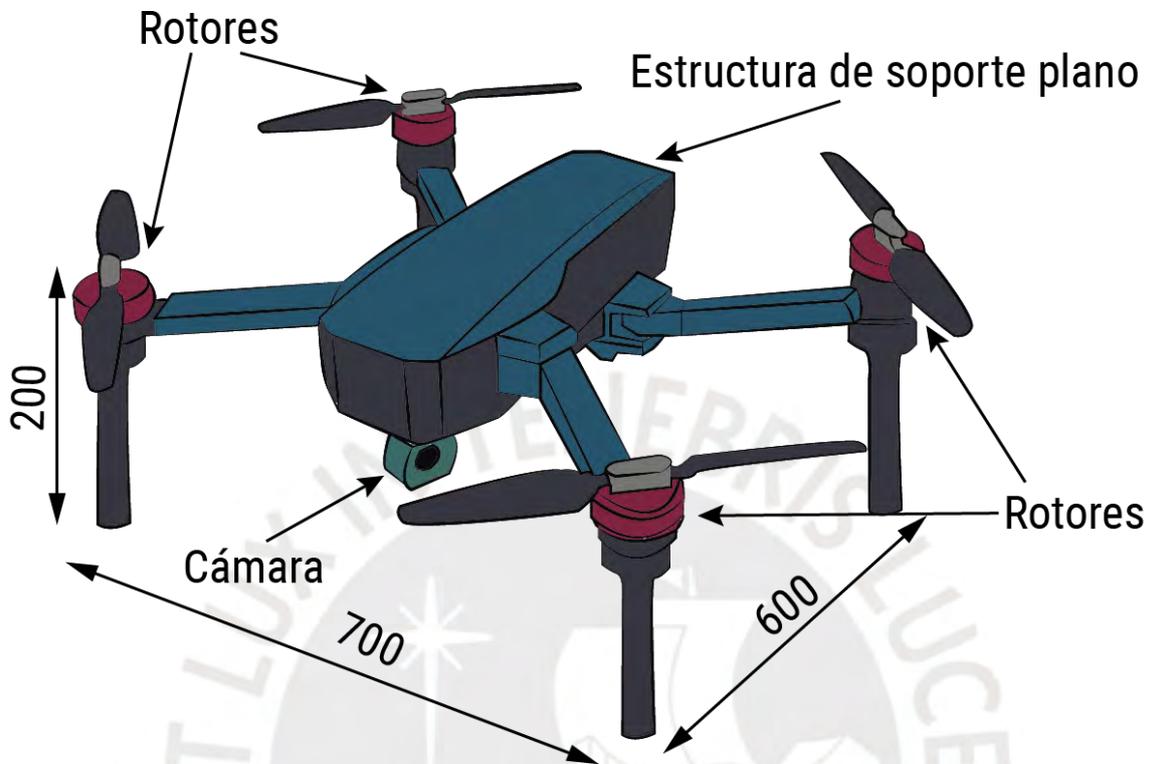


Figura 3.10 Solución 1 (Fuente: Elaboración propia)

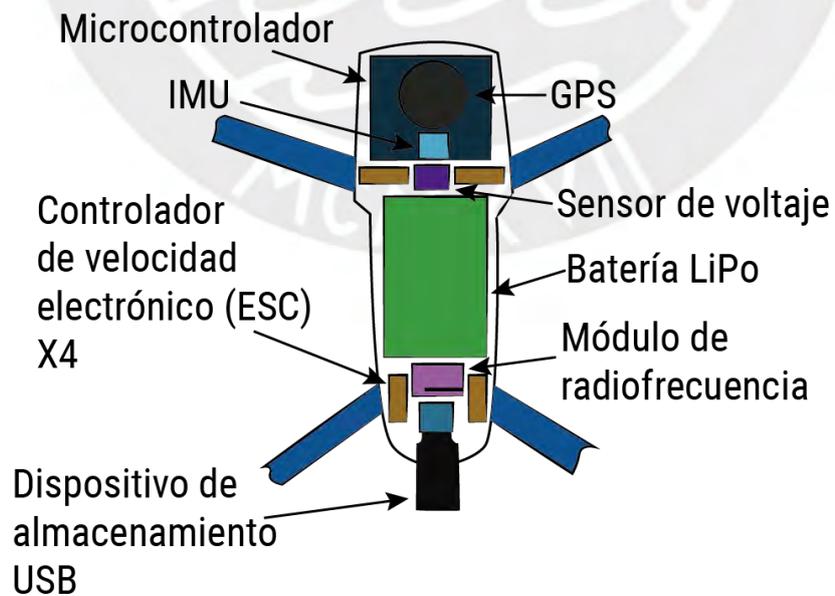


Figura 3.11 Solución 1 – Ubicación de componentes (Fuente: Elaboración propia)

### 3.5.2. Solución 2

El segundo concepto (Figura 3.12) plantea el desplazamiento del sistema mediante el movimiento de las alas accionadas por un mecanismo de caja reductora utilizando un motor DC. El aleteo se asemeja al movimiento de las aves en el aire. El desplazamiento en el plano se realiza mediante el accionamiento de la cola utilizando servomotores y la elevación de acuerdo a la velocidad del aleteo. Las dimensiones corresponden a 1000 x 500 x 200 mm

Los controladores, actuadores, sensores y la batería de alimentación de tipo LiPo se encuentran dentro de la estructura de soporte tubular (fuselaje), ubicados de tal manera exista una distribución en el peso de toda esa estructura (Figura 3.13). La parte superior de la estructura es removible lo que permite acceder a todos los componentes. El control de trayectoria lo realiza un controlador de vuelo mediante los parámetros adquiridos del sistema de medición inercial propio del controlador y el GPS. Por otro lado, la interfaz es ejecutada en una plataforma computacional (PC o laptop) y la comunicación se realiza mediante un módulo de comunicación inalámbrica habilitada por una red wifi.

Dispone de dos cámaras que permite el registro de la información visual recolectada cuando el sistema se encuentre navegando en el campo de cultivo de arándanos. La ubicación de estas cámaras es en cada uno de los lados laterales de la estructura de manera estática. La información recolectada se encuentra almacenada en una tarjeta micro SD que se encuentra en la parte superior de la estructura, la cual es retirada cuando termine su ciclo de operación y utilizar la información registrada para su procesamiento.

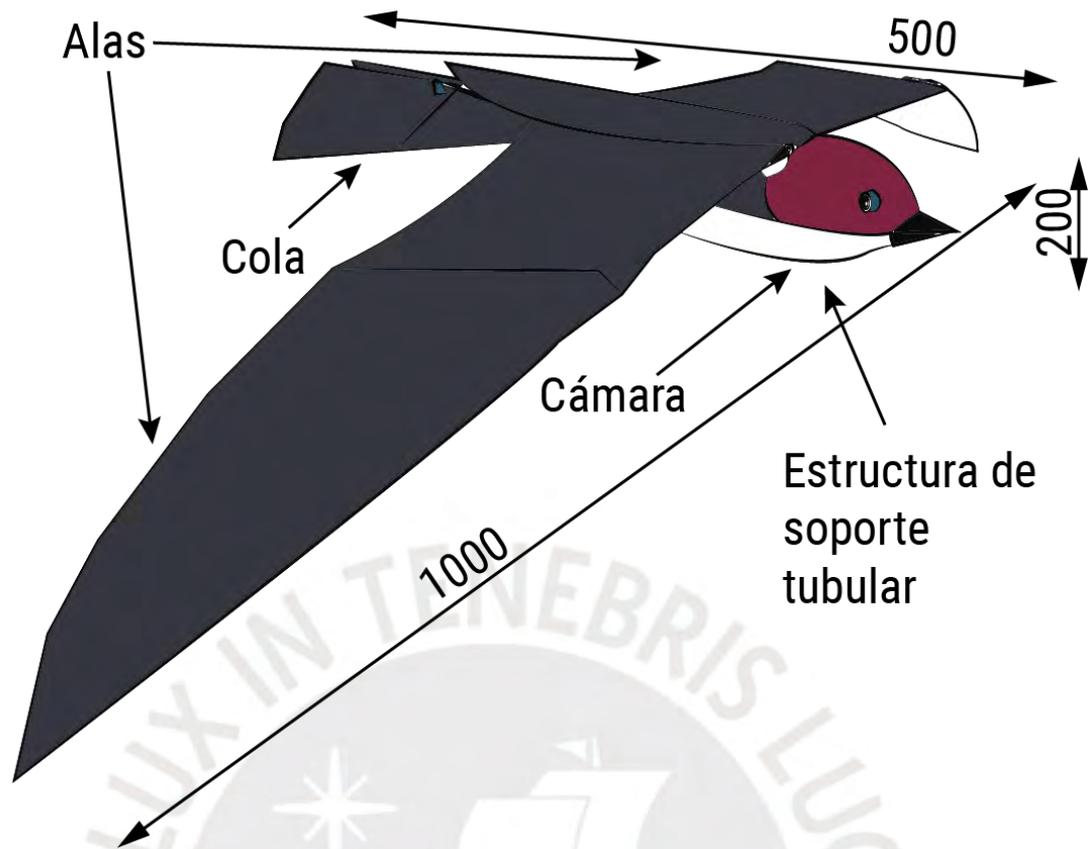


Figura 3.12: Solución 2 (Fuente: Elaboración propia)

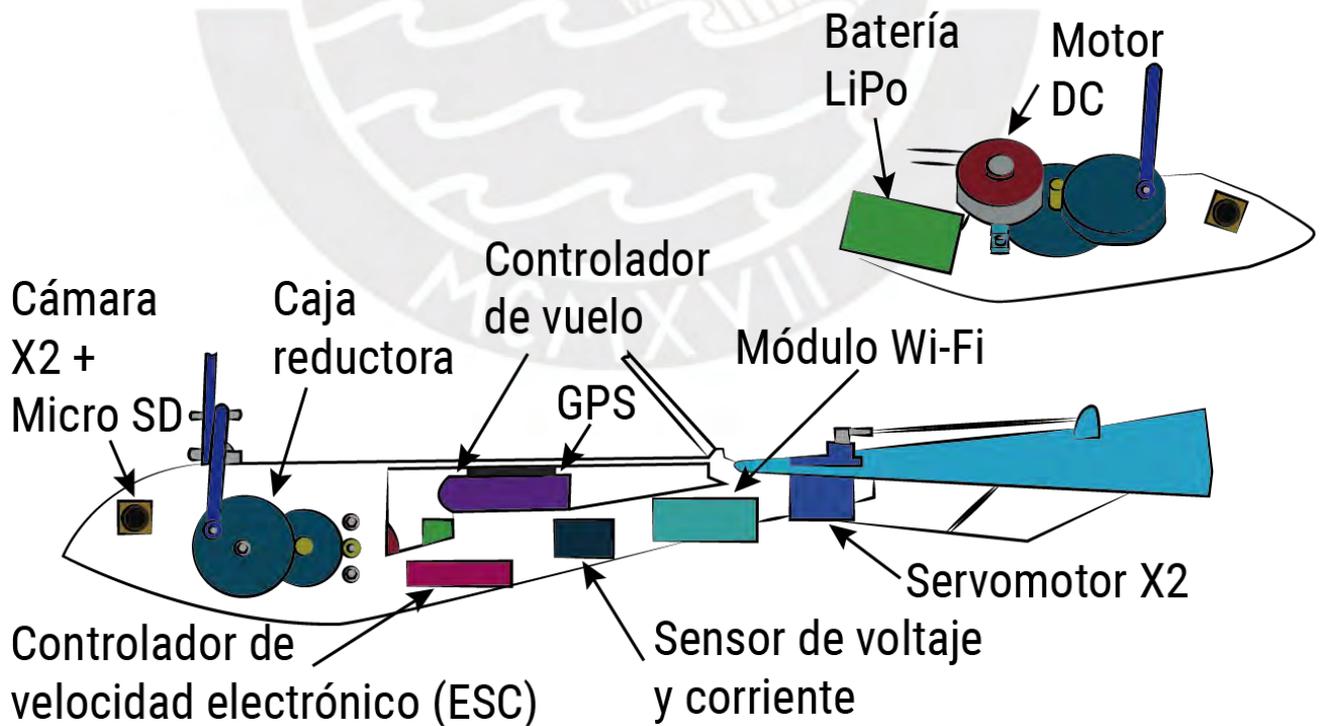


Figura 3.13: Solución 2 – Ubicación de componentes (Fuente: Elaboración propia)

### 3.5.3. Solución 3

El último concepto (Figura 3.14) plantea el desplazamiento del sistema mediante el giro de una sola hélice accionada por un motorreductor DC ubicado en la parte posterior. Su configuración de “ala volante” le permite el desplazamiento en el plano mediante el accionamiento de alerones por medio de micro motores paso a paso, y la elevación de acuerdo a la velocidad de giro de la hélice.

Los controladores, actuadores, sensores y la batería de alimentación de tipo NiMH se encuentran dentro de la estructura de soporte tubular (fuselaje), ubicados de tal manera exista una distribución en el peso de toda esa estructura (Figura 3.15). La parte superior de la estructura es removible lo que permite acceder a todos los componentes. El control de trayectoria lo realiza un computador de placa reducida mediante los parámetros adquiridos de la unidad de medición inercial y el GPS. Por otro lado, la interfaz es ejecutada en una Tablet, gracias a ello la comunicación se realiza mediante telefonía móvil 4G.

Dispone de dos cámaras que permiten el registro de la información visual recolectada en diferentes resoluciones cuando el sistema se encuentre navegando en el campo de cultivo de arándanos. La disposición de estas cámaras es estática y ubicadas en la parte superior mediante un acople a la estructura. Por medio de la comunicación de telefonía móvil, la información recolectada es almacenada en un servidor en la nube. De esa manera cuando termine su ciclo de operación se utiliza la información registrada para su procesamiento.

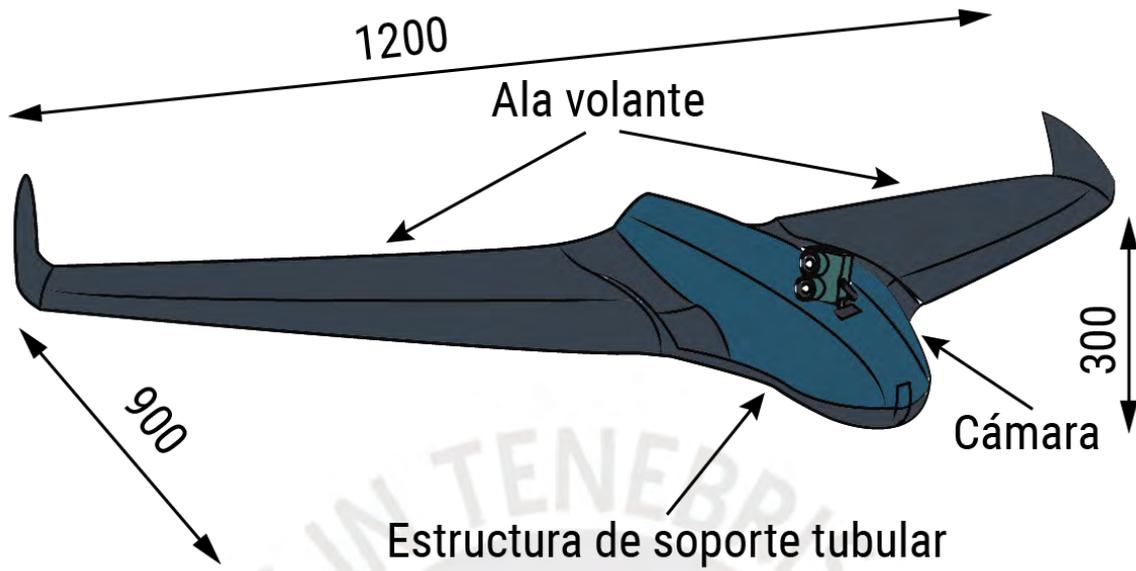


Figura 3.14: Solución 3 (Fuente: Elaboración propia)

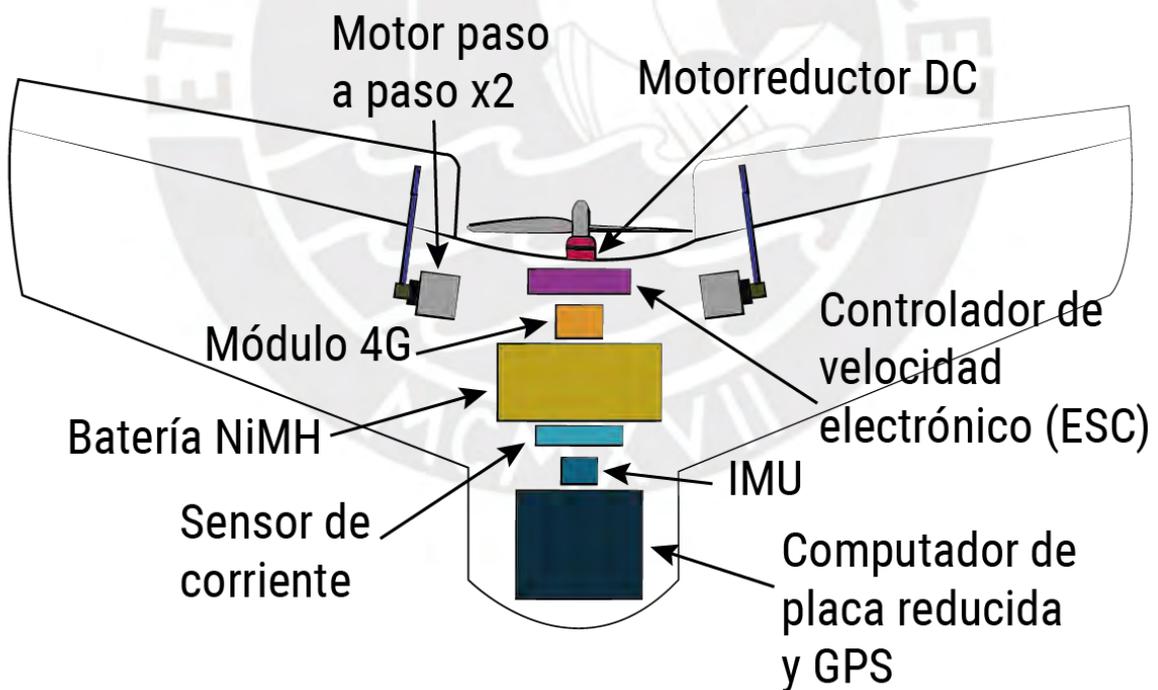


Figura 3.15: Solución 3 – Ubicación de componentes (Fuente: Elaboración propia)

### 3.6 Análisis técnico - económico

En esta sección se realiza una evaluación de las soluciones de acuerdo a criterios técnicos y económicos relevantes para el proyecto. Cada criterio de evaluación tiene un multiplicador diferente según la importancia técnica o valor que agrega al sistema, los puntajes de los criterios se asignan del 1 al 4 y son descritos a continuación.

#### 3.6.1. Criterios técnicos

A. Complejidad mecánica:

El multiplicador asignado a este criterio es 3, debido a que la dinámica del sistema está ligada al desempeño integral. La interacción de cada parte independiente resulta en la aplicación conjunta del control del sistema en general. Un puntaje mayor implica una menor complejidad y viceversa.

B. Capacidad de registro visual:

El multiplicador asignado a este criterio es 4, debido a que mide la capacidad del sistema para registrar las imágenes y/o videos, lo cual está relacionado a la función principal del sistema. Un puntaje mayor implica una mayor capacidad de registro y viceversa.

C. Facilidad de operación:

El multiplicador asignado a este criterio es 3, debido a que mide la facilidad de los colaboradores de manipular el sistema mediante el uso de la interfaz. Se realiza una medición cualitativa de la interacción de la interfaz con el operario. Un puntaje mayor implica una mayor facilidad de operación y viceversa.

### 3.6.2. Criterios económicos

#### A. Cantidad de motores:

El multiplicador asignado a este criterio es 3, debido a que analiza el efecto del uso de un número mayor de motores en el sistema sobre los costos totales. Un puntaje mayor implica una menor cantidad de motores y viceversa.

#### B. Cantidad de sensores:

El multiplicador asignado a este criterio es 3, debido a que analiza el efecto del uso de un número mayor de sensores en el sistema sobre los costos totales. Un puntaje mayor implica una menor cantidad de sensores y viceversa.

#### C. Costo relativo de tecnología:

El multiplicador asignado a este criterio es 4, debido a que analiza el efecto de los costos de todos los componentes y dispositivos del sistema de manera global. Se realiza una medición cualitativa relativa en base a las tecnologías existentes. Un puntaje mayor implica un menor costo relativo y viceversa.

### 3.6.3. Resultados de evaluación

La evaluación de las soluciones y justificación de los puntajes se encuentran a continuación. Cada concepto de solución ha sido puntuado con un número del 1 al 4, reservando el puntaje 4 para la solución ideal, como se presentará en la Tabla 3.2.

#### A. Evaluación - Complejidad mecánica:

Para realizar la puntuación se realizará un análisis cualitativo de las alternativas de las funciones “Impulsar/detener movimiento” y “Realizar movimiento” según las siguientes consideraciones:

o ¿La alternativa permite realizar las funciones descritas anteriormente mediante la interacción directa de componentes mecánicos? (3 puntos)

o ¿La alternativa permite realizar las funciones descritas anteriormente mediante la interacción indirecta de componentes mecánicos? (2 puntos)

o ¿La alternativa permite realizar las funciones descritas anteriormente mediante la interacción indirecta y directa de componentes mecánicos? (1 punto)

Según lo propuesto la puntuación para las soluciones es la siguiente:

Solución 1 (Configuración de cuatro rotores simétricos con propelas) = 3 puntos

Solución 2 (Configuración aleteo más configuración de cola) = 2 puntos

Solución 3 (Configuración de ala volante con hélice posterior) = 3 puntos

B. Evaluación - Capacidad de registro visual:

Para realizar la puntuación se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones para las soluciones:

o Si la solución permite el registro de un conjunto imágenes y/o videos mediante un solo ciclo de operación que requiera un componente adicional, la puntuación es de 1.

o Si la solución permite el registro de un conjunto de imágenes y/o videos mediante un solo ciclo de operación, la puntuación es de 2.

o Si la solución permite el registro de más de un conjunto de imágenes y/o videos mediante un solo ciclo de operación, la puntuación es de 3.

Según lo propuesto la puntuación para las soluciones es la siguiente:

Solución 1 (Registro de un conjunto mediante un solo ciclo de operación) = 2 puntos

Solución 2 (Registro de dos conjuntos mediante un solo ciclo de operación) = 3 puntos

Solución 3 (Registro de un conjunto mediante un solo ciclo de operación) = 2 puntos

C. Evaluación - Facilidad de operación:

Para realizar la puntuación se realizará un análisis cualitativo de la alternativa del dominio interacción con el usuario y las señales de entrada según las siguientes consideraciones:

o ¿La alternativa permite realizar las consideraciones descritas anteriormente mediante la interacción de la interfaz con un operario con baja o nula experiencia? (3 puntos)

o ¿La alternativa permite realizar las consideraciones descritas anteriormente mediante la interacción de la interfaz con un operario con mediana experiencia? (2 puntos).

Según lo propuesto la puntuación para todas las soluciones es de 2 puntos, debido a que, a pesar de utilizar una plataforma diferente, la interfaz y operatividad corresponde a la misma para todas las soluciones.

D. Evaluación - Cantidad de motores:

Para realizar la evaluación de este criterio se tomarán en cuenta la cantidad de motores en general que utiliza cada concepto de solución. El uso de solamente un motor corresponde a un puntaje de 4, el uso de 2 a 3 motores corresponde a un puntaje de 3, el uso de 4 motores corresponde a un puntaje de 2 y finalmente para el uso de un número mayor a 4 motores el puntaje es 1.

Según lo propuesto la puntuación para las soluciones es la siguiente:

Solución 1 (4 motores) = 2 puntos

Solución 2 y 3 (3 motores) = 3 puntos

E. Evaluación - Cantidad de sensores:

Para realizar la evaluación de este criterio se tomarán en cuenta la cantidad de sensores como componente individual que utiliza cada concepto de solución. El uso de solamente un sensor corresponde a un puntaje de 4, el uso de 2 sensores corresponde a un puntaje de 3, el uso de 3 sensores corresponde a un puntaje de 2 y finalmente para el uso de un número mayor a 3 sensores el puntaje es 1.

Según lo propuesto la puntuación para las soluciones es la siguiente:

Solución 1 y 3 (3 sensores) = 2 puntos

Solución 2 (2 sensores) = 3 puntos

F. Evaluación - Costo relativo de tecnología:

Para realizar la puntuación de este criterio se ordenará las soluciones según los costos totales relativos de tecnología que utilizan cada sistema; para luego asignar un puntaje de 4 al de menores costos (solución ideal) y 2, 3 y 1 a las otras soluciones consecuentemente.

Según lo propuesto la puntuación para las soluciones es la siguiente:

Solución 2 y 3: 3 puntos, debido a que presentan un número de motores y sensores menor en comparación a la otra solución, lo que corresponde un costo relativo total menor.

Solución 1: 2 puntos, debido a que utiliza un número elevado de motores y sensores en comparación a las otras soluciones, lo que corresponde a una solución más costosa.

Tabla 3.2: Tabla de criterios y resultados de evaluación

CRITERIOS TÉCNICOS			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Ideal	
Nro.	Criterio	G	P	PxG	P	PxG	P	PxG	P	PxG
CT1	Complejidad mecánica	3	3	9	2	6	3	9	4	12
CT2	Capacidad de registro visual	4	2	8	3	12	2	8	4	16
CT3	Facilidad de operación	3	2	6	2	6	2	6	4	12
Suma			7	23	7	24	7	23	12	40
Subtotal Criterio Técnico Estandarizado			0.58	0.58	0.58	0.60	0.58	0.58	1.00	1.00

CRITERIOS ECONÓMICOS			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Ideal	
Nro.	Criterio	G	P	PxG	P	PxG	P	PxG	P	PxG
CE1	Cantidad de motores	3	2	6	3	9	3	9	4	12
CE2	Cantidad de sensores	3	2	6	3	9	2	6	4	12
CE3	Costo relativo de tecnología	4	2	8	3	12	3	12	4	16
Suma			6	20	9	30	8	27	12	40
Subtotal Criterio Económico Estandarizado			0.50	0.50	0.75	0.75	0.67	0.68	1.00	1.00

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, según los puntajes asignados y afectados por los multiplicadores correspondientes para cada criterio, se presenta la siguiente gráfica en la Figura 3.16 en la cual se observa que la solución 1 tiene una puntuación técnica y económica menor a 0.6, por lo que es descartada. Entre la solución 2 y 3, el número 3 se acerca más a la línea de tendencia. Sin embargo, la solución 2 es ligeramente mayor en puntuación técnica y relativamente notablemente mayor en puntuación económica, por lo tanto, el concepto de solución elegido para el sistema es el número 2 (“Khallwa”).

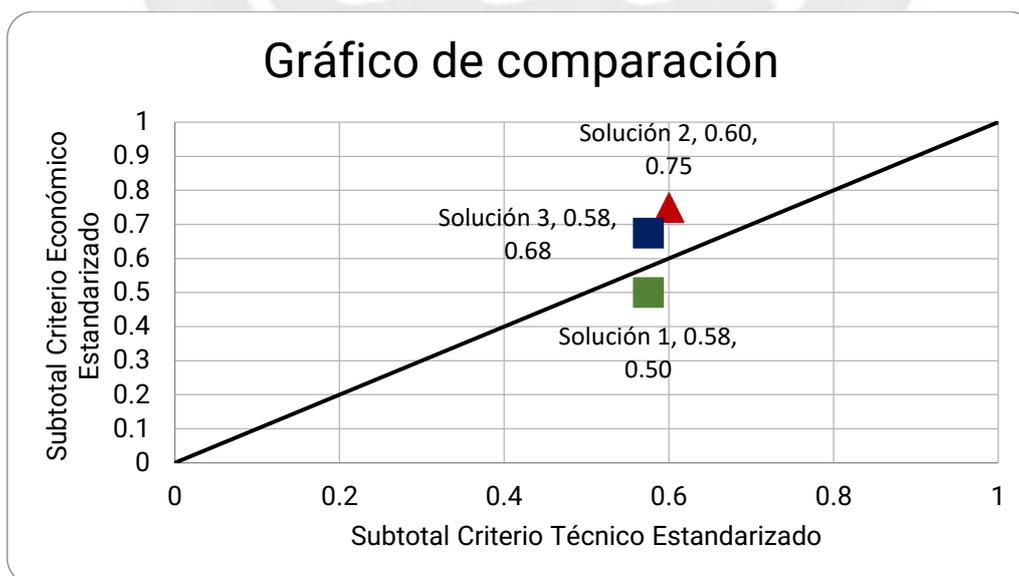


Figura 3.16: Gráfico de comparación de relación de criterios técnicos – económicos (Fuente: Elaboración propia)

### 3.7 Solución óptima

Para llegar a la solución óptima se realizarán mejoras en la solución 2: Khallwa. Se proponen cambios en el diseño a partir del análisis de los criterios con menores puntajes en la solución ganadora.

Complejidad mecánica:

La puntuación para este criterio es de 2 puntos, los cuales pueden subir hasta 3 si el mecanismo de transmisión de movimiento del motor utiliza un juego de caja reductora más compacto. Sin embargo, esta medida puede afectar el desempeño del sistema mismo, por lo tanto, se tendrá un análisis con mayor detalle en el desarrollo del diseño integrado.

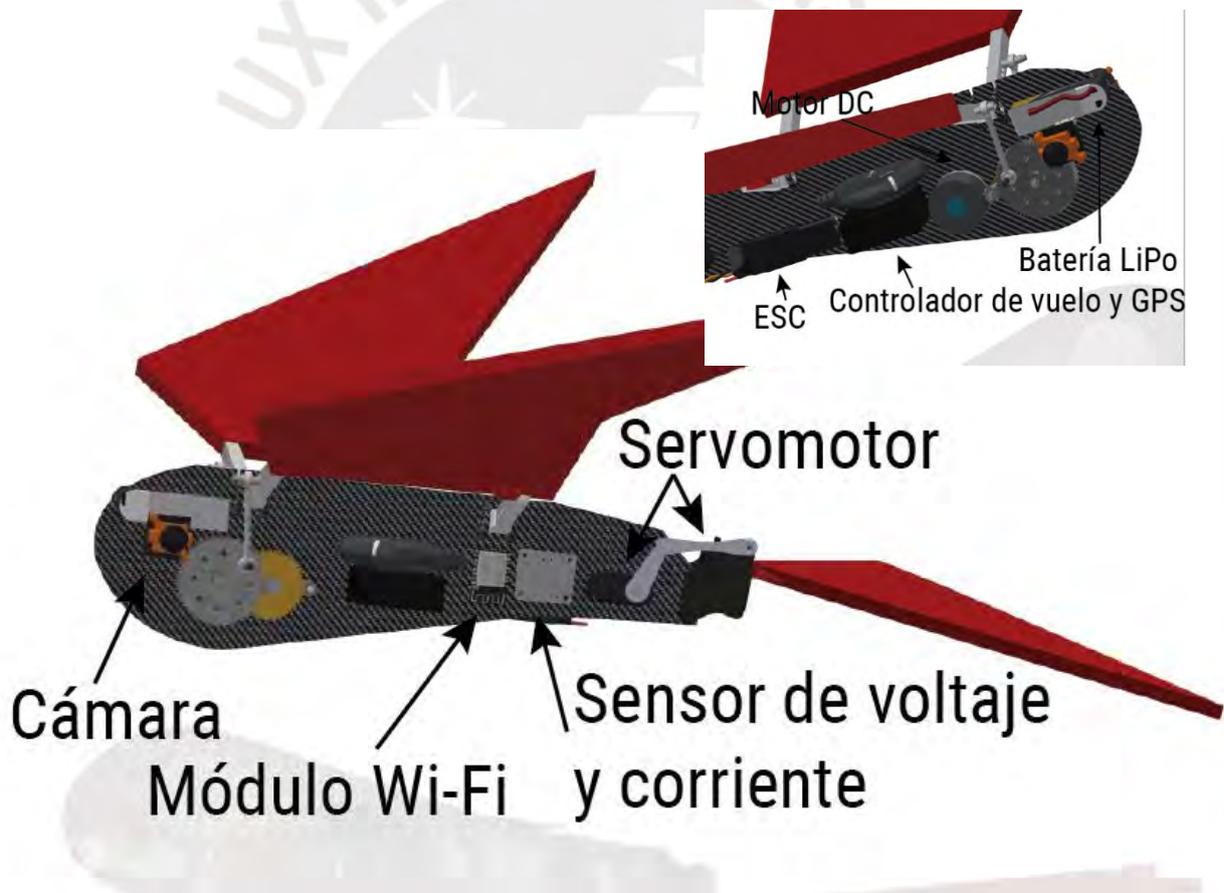


Figura 3.17: Diseño óptimo (“Khallwa”) (Fuente: Elaboración propia)

## CAPÍTULO 4: DISEÑO INTEGRADO

El sistema presentado, que es el concepto de solución óptimo entre tres propuestas presentadas para resolver la problemática, consiste en un vehículo aéreo no tripulado de tipo ave. Este robot aéreo está compuesto por una estructura de fibra de carbono y polipropileno expandido liviano y resistente. Su mecanismo de vuelo de ala batiente le permite realizar un vuelo ligero y con maniobrabilidad. El control de vuelo lo realizará un autopiloto, de esta manera el sistema será capaz de tener un desplazamiento autónomo y recorrer el área de cultivo indicada.

Luego de encendida la tarjeta de control, el sistema comenzará su desplazamiento cuando, a través de una conexión wifi entre el sistema embebido y la computadora, se entreguen los parámetros del vuelo tales como: coordenadas del inicio del vuelo, altura promedio, distancia que deberá recorrer y coordenadas del lugar de destino. Una vez configurada la tarjeta con los parámetros descritos, el siguiente paso es el vuelo del robot aéreo.

Una vez el robot aéreo termina de realizar el recorrido o el sensor de batería indique que la batería LiPo no tiene la suficiente energía para que continúe su desplazamiento, el sistema volará a su punto de partida. Cuando el sistema retorne a su destino, se separa el protector que alberga las cámaras para retirar las tarjetas micro SD que contienen las imágenes capturadas.

Finalmente, a través de un software, se analizará la información y se generará la clasificación de los arándanos por su estado de madurez.

La Figura 4.1 es una representación del mapa de vuelo estimado que realizaría el robot aéreo en un hectárea de campo de cultivo de arándanos. Generalmente, se ubican 23 hileras de arbustos de un ancho de 1 metro con una distancia entre ellos de 3.5 metros. Se visualiza el recorrido que realizaría el robot aéreo entre los surcos, con lo que recorrería una distancia de aproximadamente 2600 metros, con lo cual a una velocidad media de 5 m/s estaría dentro de los 10 minutos de autonomía de vuelo.

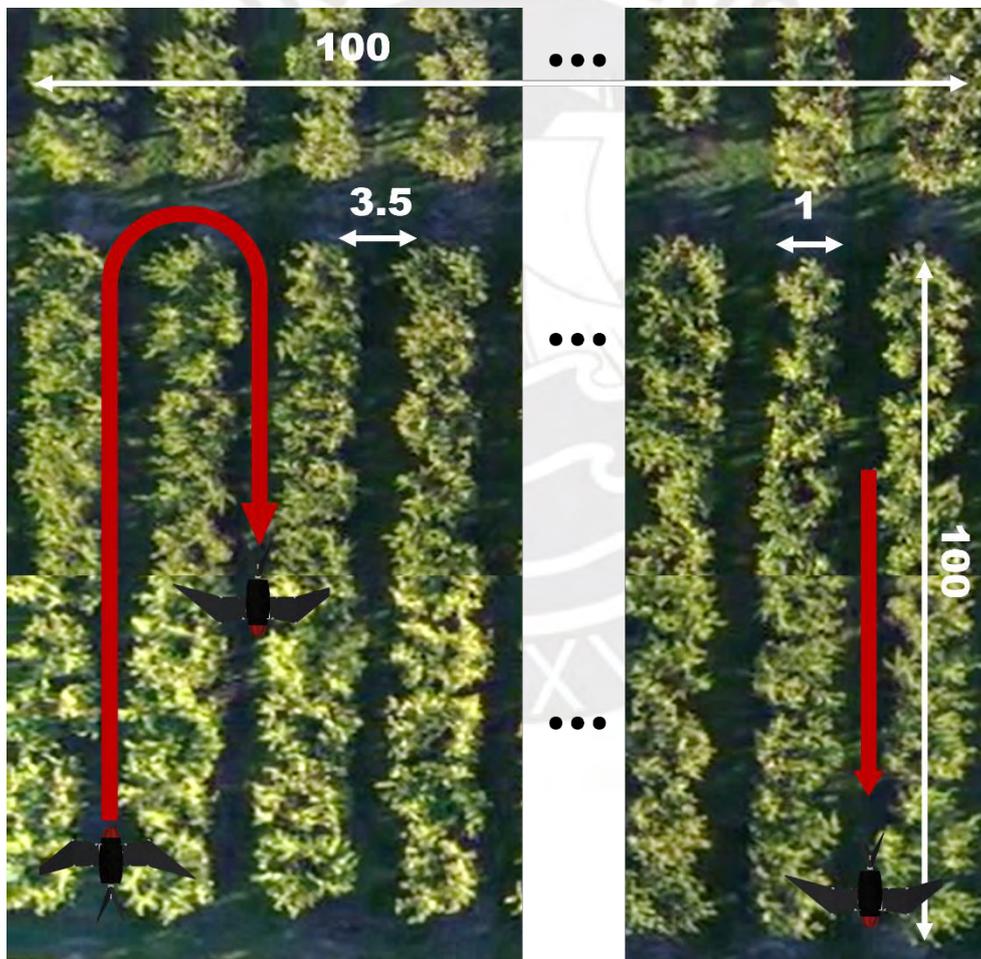


Figura 4.1: Mapa de vuelo estimado (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1 Diseño mecánico

En este apartado se trabajará el diseño mecánico del concepto de solución seleccionado. La Figura 4.2 es una representación del robot aéreo realizado en el software Autodesk Inventor 2019 y muestra el ensamble completo del sistema. Para lograr alcanzar este diseño, se realizarán los cálculos necesarios para el dimensionamiento, selección de los materiales y componentes desde una perspectiva mecánica. Asimismo, se realizarán simulaciones a manera de verificación adicional de la estabilidad del robot aéreo en el aire (ver Anexo 3).

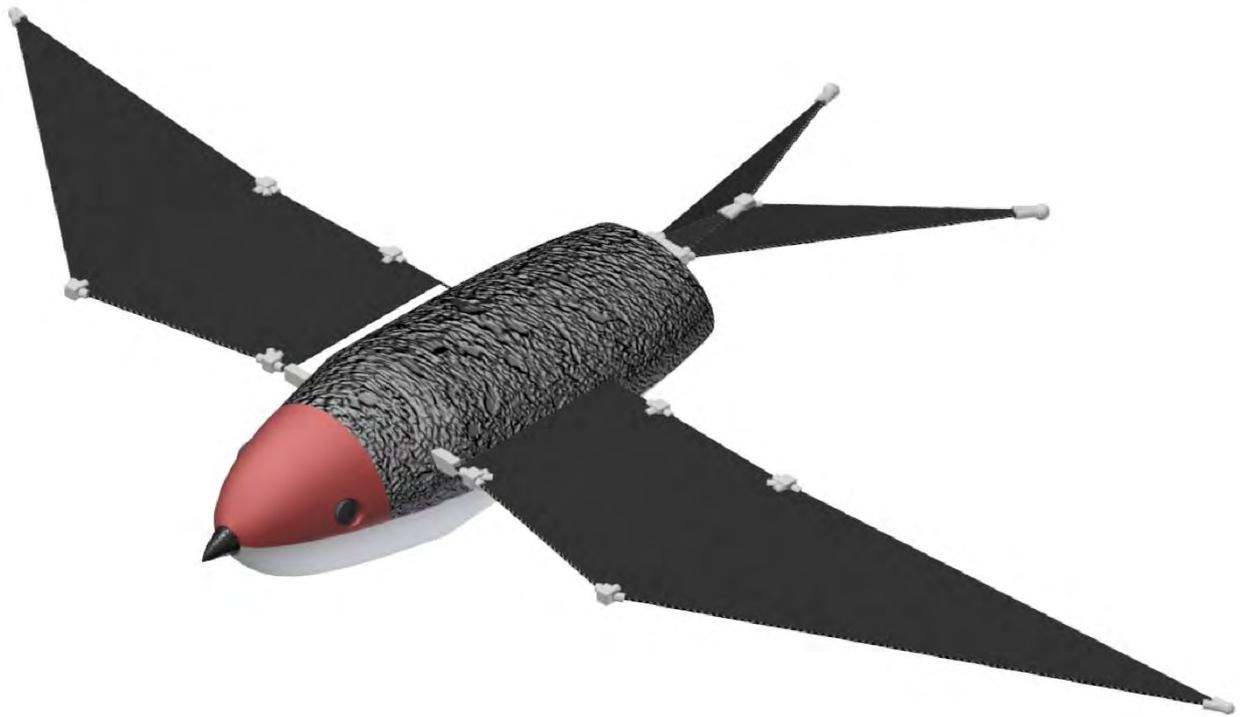


Figura 4.2: Diseño 3D (“Khallwa”) (Fuente: Elaboración propia)

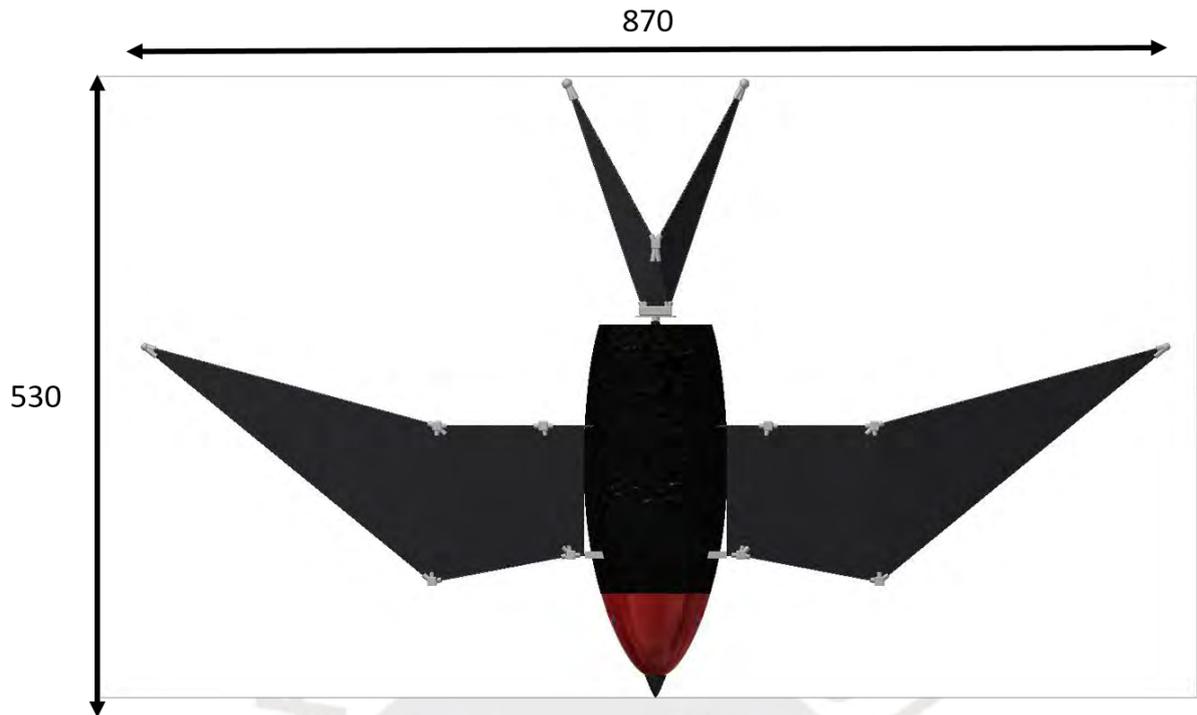


Figura 4.3: Vista superior del robot aéreo (Fuente: Elaboración propia)



Figura 4.4: Vista frontal del robot aéreo (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 4.1: Tabla de medidas aproximadas de los elementos a utilizar en el robot aéreo

Elemento	Dimensiones aprox. (mm x mm x mm)	Peso aproximado (g)
Batería LiPo	57 x 13 x 30	50
Cámara x2	19 x 20 x 19	27
Controlador de velocidad (ESC)	48 x 23 x 6	17
Controlador de vuelo	38 x 55 x 16	37.2
Módulo de potencia (sensor de voltaje y corriente)	26 x 24 x 2	20
Modulo GPS	Ø 50 x 15	22
Modulo WiFi	18 x 39 x 5	3
Motor DC	Ø 28 x 17	48
Servomotores x2	28 x 22 x 8	6
Engranaje Piñón 11 T - 0.5 M	Ø 7 x 10	1
Engranaje 60 T - 0.5 M	Ø 31 x 10	30
Engranaje 12 T - 0.6 M x2	Ø 8 x 9	2
Engranaje 64 T - 0.6 M x2	Ø 40 x 10	104
Varilla conector de ala x2	53 x 7 x 10	6
Estructura de soporte	260 x 80 x 2	34
Articulación de ala x2	60 x 8 x 8	2
Varillas huecas ø 2 mm	variable	16.5
Juntas para las varillas	variable	6
Fuselaje superior e inferior	variable	9.5
Fuselaje de cabeza	variable	32
Membrana de alas y cola	variable	6
Otros (cables, cintillos, tornillos, tuercas, rodamientos, etc)	variable	+10% total
	<b>TOTAL</b>	<b>538.67</b>

Fuente: Elaboración Propia

De la presente tabla se puede concluir que, ninguno de los elementos excede las dimensiones máximas del robot aéreo. Por otro lado, se obtiene que el peso promedio total de los elementos será de 538.67 g. Por practicidad, se redondeará esta magnitud a 550 g, es decir 5.4 N (asumiendo una gravedad de  $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

#### 4.1.1. Cálculos y selección

Un vehículo aéreo no tripulado de tipo ave es un vehículo de vuelo que genera fuerzas aerodinámicas y momentos para volar. La flexibilidad de las alas contribuye a ganar suficiente fuerza de sustentación y empuje. Como punto de partida se inicia con las principales fuerzas fundamentales que deben equilibrarse para el vuelo. La fuerza de sustentación generada por las alas es igual al peso del sistema, se detalla ello en la ecuación (1), y que el empuje generado por el mismo es igual a la fuerza de arrastre o resistencia del aire, se detalla ello en la ecuación (2). Esto se debe a que, la fuerza de sustentación se produce en una dirección perpendicular a la del flujo de aire, por lo tanto, existe una componente de la fuerza de sustentación en la dirección del vuelo horizontal.

$$m \times g = C_l \times \frac{\rho}{2} \times S \times v^2 \quad (1)$$

$$F_d = C_d \times \frac{\rho}{2} \times S \times v^2 \quad (2)$$

El producto de  $m$  con  $g$  corresponde al peso total del sistema,  $C_l$  es el coeficiente de sustentación del perfil,  $C_d$  es el coeficiente de arrastre del perfil,  $S$  es el área total del ala,  $F_d$  es la fuerza de arrastre y  $v$  es la velocidad de vuelo. Despejando  $v$  a partir de (1) se obtiene:

$$v = \sqrt{\frac{2 \times g \times m}{C_l \times \rho \times S}} \quad (3)$$



Figura 4.5: Geometría de ala del robot aéreo (Fuente: Elaboración propia)

Entre la ecuación (2) y la ecuación (3) resulta más relevante el desarrollo de esta última, debido a que, el efecto total de la sustentación es compensada por el efecto de empuje (Srigrarom y Leong Chan, 2015). Por lo tanto, a partir del peso total del sistema equivalente a 5.4 N (véase Tabla 4.1), el área total del ala, que equivale al producto de la envergadura por el largo del mismo resultando en un valor de  $0.032276 \text{ m}^2$  (los valores de la geometría han sido detallados en la Figura 4.4), la densidad del aire a alturas cercanas al nivel del mar equivalente a  $1.225 \text{ kg/m}^3$  y siendo 0.83 el coeficiente de sustentación del perfil (tipo Clark-Y) aproximado utilizando la referencia de las dimensiones de la geometría del ala (Srigrarom y Leong Chan, 2015); se obtiene como velocidad el valor de  $6.9 \text{ m/s}$ , que corresponde a un valor mayor a  $2 \text{ m/s}$ , que es el valor mínimo de velocidad del requerimiento.

#### 4.1.1.1 Alas

Para lograr un alto efecto de empuje, se debe tener como objetivo una alta velocidad. Eso significa un batir de alas de gran impacto. Como se puede observar, con una posición de ala en “V” notorio, la fuerza de sustentación FAM, que es decisiva para el modelo, es significativamente menor que la fuerza de sustentación FAF generada en el ala. Por lo tanto, es aconsejable mantener un ángulo de aleteo pequeño para generar sustentación, se considera que los ángulos de aleteo entre  $\pm 20^\circ$  y  $\pm 40^\circ$  son adecuados (Silin, 2010).

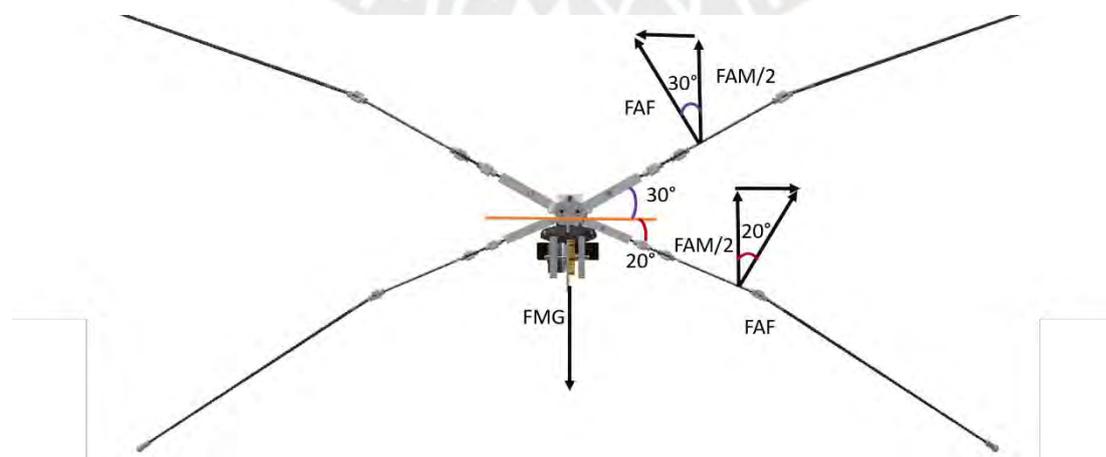


Figura 4.6: Esquema de representación de fuerzas para ángulos de apertura. (Fuente: Elaboración propia)

Por otro lado, al elegir la frecuencia de aleteo del sistema, se puede tomar como referencia los modelos naturales, se puede estimar la frecuencia mediante la siguiente ecuación (Abas, Mohd, Yusof y Ahmad, 2016):

$$fr = e^{\log\left(\frac{20}{m}\right)} \quad (4)$$

En donde  $m$  corresponde a la masa total del sistema. En consecuencia, se obtiene una frecuencia recomendada de 4.963 Hz.

Por último, el par de fuerza mínimo que requiere el mecanismo que permite el aleteo de las alas está expresado en la siguiente ecuación:

$$T_{min} = 2 \times ma \times g \times r \quad (5)$$

En donde  $ma$  corresponde a la masa del ala y  $r$  el radio de fuerza, que para efectos del diseño corresponde a la distancia del centro de masa de un ala a la estructura de soporte. Ambos valores son detallados en la Figura 4.6. Con ello el par de fuerza mínimo equivale a 0.045 Nm.

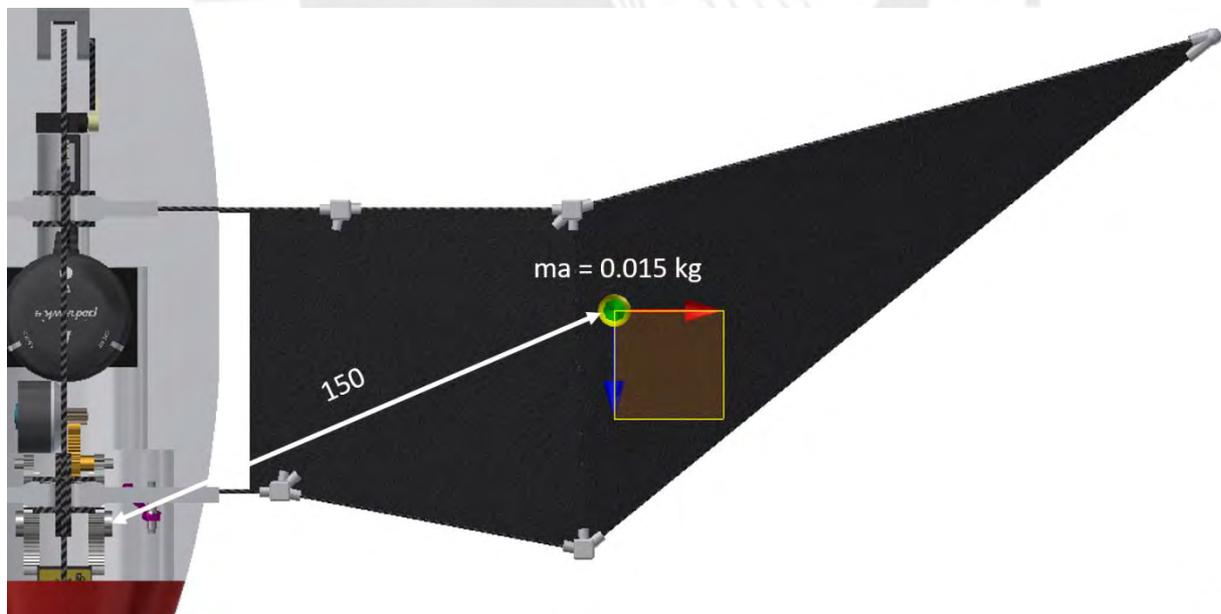


Figura 4.7: Esquema de representación de dimensiones para el cálculo del par de fuerza mínimo. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1.1.2 Mecanismo de vuelo

El mecanismo de aleteo es la parte más crítica del sistema, ya que convierte la energía eléctrica proporcionada por la batería en movimiento de aleteo de las alas. El diseño del mecanismo corresponde a un motor DC con un eje transversal que permite al mecanismo de manivela de doble engranaje realizar el movimiento de giro. Los engranajes giratorios y las alas batientes no están en el mismo plano, por lo que la varilla del conector debe poder girar. La varilla del conector dispone de rótulas para garantizar el funcionamiento del mecanismo.

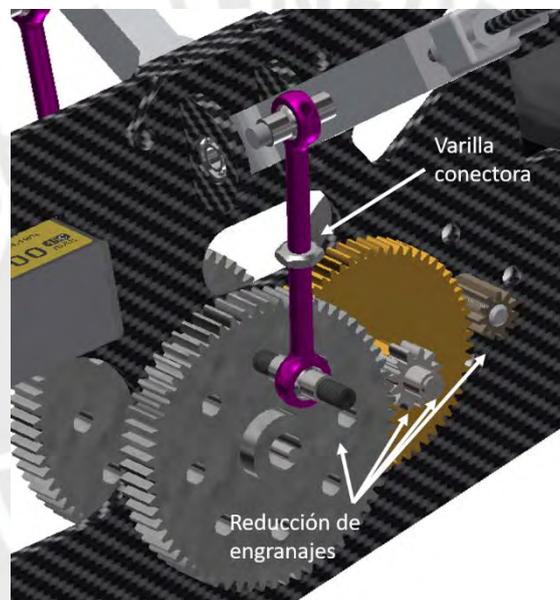


Figura 4.8: Esquema de representación del mecanismo de vuelo. (Fuente: Elaboración propia)

El motor debe ser de un tamaño pequeño para garantizar un peso reducido. Asimismo, para aumentar el par y alcanzar la frecuencia de aleteo requerida, es necesario incluir una reducción mediante engranajes, ya que generalmente los motores con esos requerimientos poseen un alto RPM. Por lo tanto, se hará el uso de cuatro engranajes de dientes rectos para transmitir la potencia del motor a la varilla conectora. El primero está conectado al eje del motor, gira a las mismas RPM del motor y posee 11 dientes de módulo 0.5. En una reducción, los engranajes engranarán si tienen el mismo módulo. El segundo y el tercero están unido mediante un eje de

diámetro de 3 mm. El segundo posee 60 dientes y es del mismo módulo que el primero. El tercero posee 12 dientes y es de módulo 0.6. Finalmente, el cuarto engranaje está unido a un eje de diámetro de 5 mm, tiene 64 dientes y es del mismo módulo que el tercero, además, al ser el engranaje de mayor dimensión, el seleccionado posee agujeros que reduce la masa y permiten que se pueda unir la varilla conectora y ejecutar el mecanismo de manivela. Finalmente, con los engranajes descritos se tiene una reducción a la salida del eje del motor de 0.034375.

#### 4.1.1.3 Cola

El diseño de la cola es de tipo basculante, provocando un momento de balanceo cuando se balancea cualquier lado. La cola basculante funciona como un timón, cuando se inclina hacia la derecha hace que el sistema gire a la derecha y viceversa. Asimismo, se puede añadir la elevación proporcionando maniobrabilidad y balanceo. El ángulo inicial recomendado para la maniobrabilidad es de  $-20^\circ$  (Srigrarom y Leong Chan, 2015).

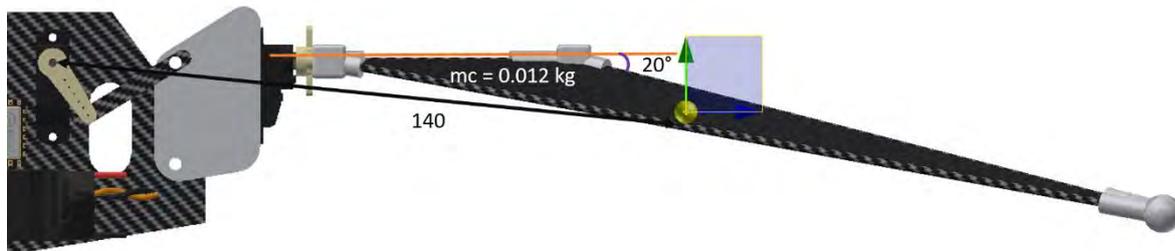


Figura 4.9: Esquema de representación de dimensiones para el cálculo del par de fuerza mínimo. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1.1.4 Mecanismo de giro

El mecanismo de giro requiere de dos motores a utilizar para garantizar la maniobrabilidad y balanceo. Se hará el uso de servomotores, ya que disponen la capacidad de mantener ángulos

fijos. El par de fuerzas que se requiere para la maniobrabilidad es descrito mediante la siguiente ecuación:

$$T_{min} = mc \times g \times r \quad (6)$$

En donde  $mc$  corresponde a la masa de la cola y  $r$  el radio de fuerza, que para efectos del diseño corresponde a la distancia del centro de masa de cola al servomotor. Ambos valores son detallados en la Figura 4.8. Con ello el par de fuerza mínimo equivale a 0.0165 Nm. Asimismo, el valor del par de fuerzas que se requiere para el balanceo es menor que la maniobrabilidad, debido a que la acción de la fuerza requiere de la mitad de la masa de la cola. Se considera que los ángulos basculantes entre  $\pm 30^\circ$  son adecuados (Srigrarom y Leong Chan, 2015).

#### **4.1.2. Dimensionamiento**

Se detalla a continuación los elementos que conforman al sistema, así como las características y tipo de material.

##### **4.1.2.1 Estructura de soporte**

El marco principal del sistema es un componente que sirve principalmente para proporcionar montaje y ubicación de los componentes. Para facilitar la localización de todas las piezas los pesos y tamaños de todos los componentes fueron modelados en el software CAD Autodesk Inventor 2019 y las configuraciones de los componentes garantizan que el centro de masa se encuentre alrededor del mecanismo de vuelo. El material elegido es fibra de carbono debido a su estructura rígida y peso reducido en comparación a otros materiales como el aluminio o fibra de vidrio. Se utilizará una lámina de 2 mm de espesor.

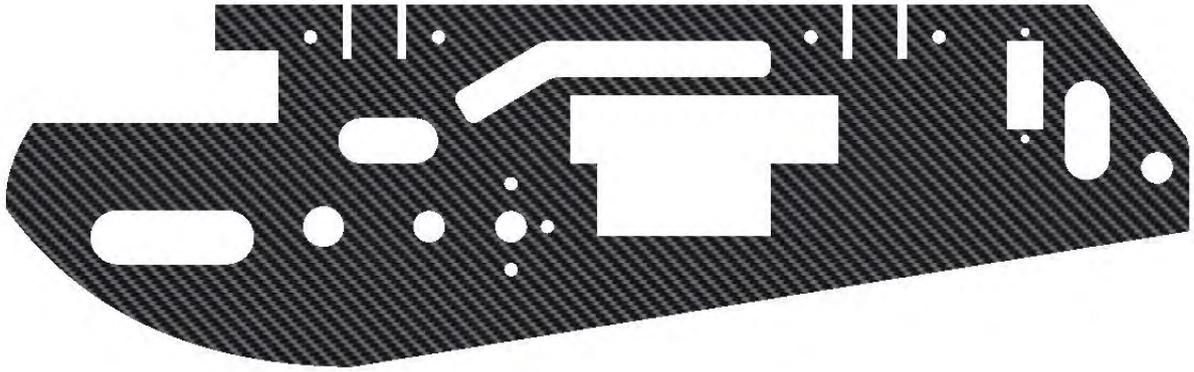


Figura 4.10: Estructura de soporte del robot aéreo en fibra de carbono de 2 mm de espesor (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1.2.2 Acople de alas y cola

Para el diseño de la estructura de las alas, se utilizarán varillas huecas de fibra de carbono comercial de 2 mm de diámetro y que permitirá que el ensamble de esta estructura sea muy liviano, flexible y altamente resistente. Estas varillas irán unidas mediante juntas. Las juntas no son estandarizadas, por lo que se deberán fabricar en material ABS y en una impresora 3D considerando los ángulos que corresponden a cada junta para el ensamble total de la estructura del ala. Asimismo, para el diseño de la estructura de la cola, se utilizará el mismo material empleado en las alas. Las juntas son diferentes en geometría, así como una junta de mayor tamaño para unirse al brazo del servomotor de giro de la cola.

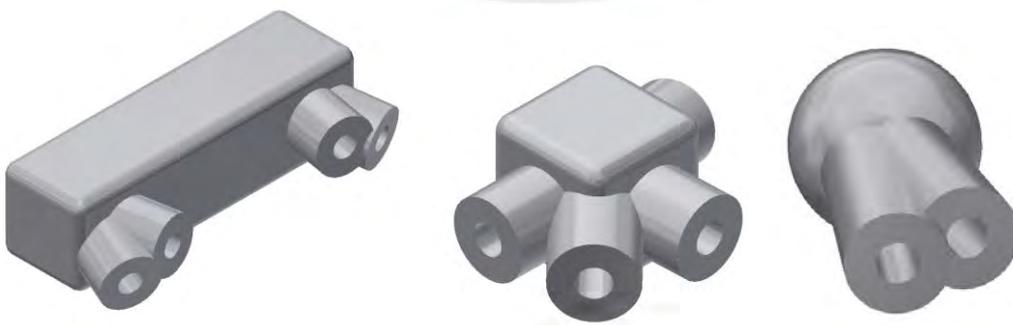


Figura 4.11: Distintas juntas en ABS empleadas para unir las varillas de fibra carbono (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, el acople de la estructura de alas con la estructura de soporte será por una articulación no estandarizada, que al igual que las juntas, se deberán fabricar en material ABS y en una impresora 3D.



Figura 4.12: Articulación de ala en ABS empleadas la estructura de las alas con el mecanismo de vuelo. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1.2.1 Estructura de protección (fuselaje)

El cuerpo de superficie que sirve como protección para todo el sistema está separado en 3 superficies: el fuselaje superior, inferior y de cabeza. El fuselaje superior e inferior será de un material extraordinariamente ligero y rígido para no aportar mayor masa al sistema y que sirva como protección y recubrimiento del mismo. El material seleccionado es la espuma de polipropileno expandido (EPP foam por su terminología en inglés). La forma y su integración con la estructura de soporte será el equivalente del perfil completo recomendado anteriormente (tipo Clark Y).



Figura 4.13: Fuselaje superior e inferior en espuma de polipropileno expandido (EPP) (Fuente: Elaboración propia)

La membrana que cubre la estructura del ala y cola será del mismo material que el utilizado en el fuselaje superior e inferior, con la diferencia que será una fina capa de alrededor de 1 mm de espesor.

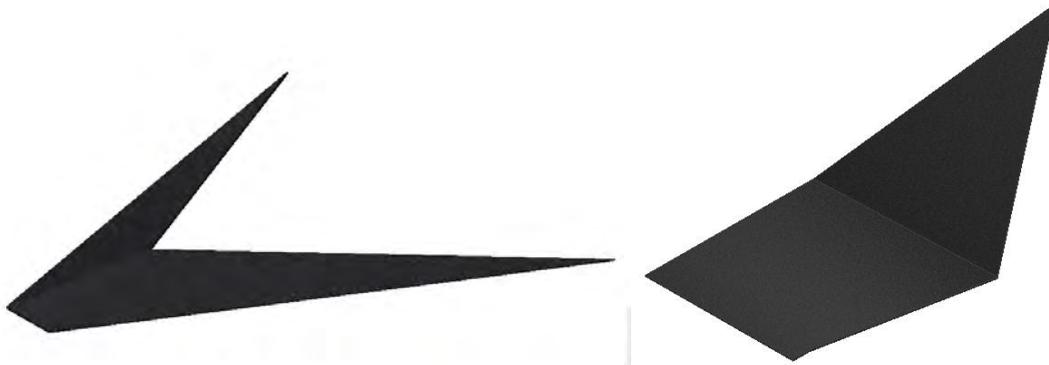


Figura 4.14: Membrana de recubrimiento para alas y cola en espuma de polipropileno expandido (EPP).  
(Fuente: Elaboración propia)

Por último, para albergar las cámaras del sistema, así como los conectores con el fuselaje de la estructura restante, el fuselaje de cabeza se deberá fabricar en material ABS y en una impresora 3D para el dimensionamiento correcto del mismo, lo que permite la facilidad de separarse y poder retirar las tarjetas micro SD de las cámaras. Para evitar las posibles vibraciones que afecten a las cámaras, se deberá colocar una espuma EVA ultraligera anti-vibración, que es la utilizada en los vehículos aéreos no tripulados más comerciales.

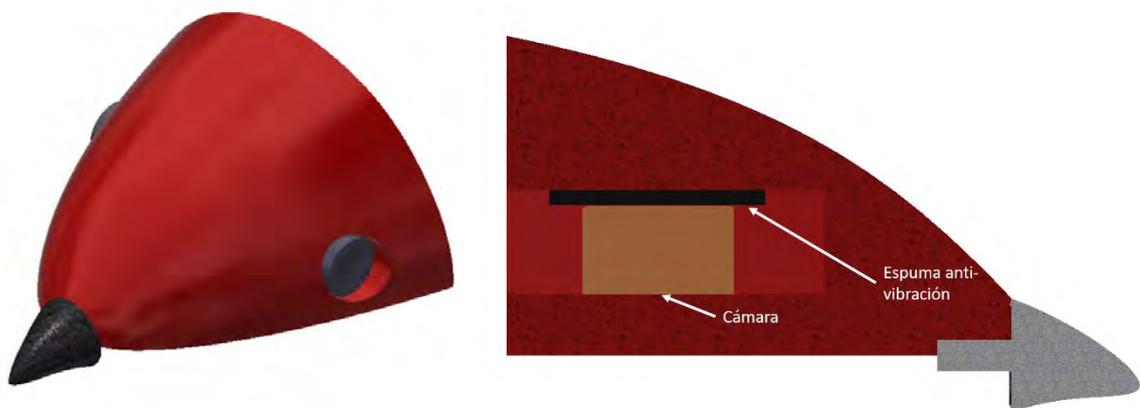


Figura 4.15: Fuselaje de cabeza en ABS y esquema de espuma anti-vibración para la cámara. (Fuente: Elaboración propia)

### 4.1.3. Proceso de fabricación

De acuerdo a lo presentado anteriormente, un número considerable de partes del robot son no estandarizadas. A continuación, se presenta una lista de los elementos a fabricar y/o manufacturar que serán requeridos en caso se lleve a la implementación la propuesta de diseño.

Tabla 4.2: Tabla de procesos de fabricación o manufactura

Nombre del elemento	Proceso de fabricación	Proceso de manufactura
Fuselaje superior e inferior	-	Corte
Membrana ala y cola	-	Corte
Estructura de soporte	-	Corte
Varillas huecas de fibra de carbono $\varnothing$ 2 mm	-	Corte
Cabeza	Impresión 3D	-
Pico	Impresión 3D	-
Soporte servomotor	Impresión 3D	-
Junta de cola T, X, F	Impresión 3D	-
Junta de ala 1, 2, F x2	Impresión 3D	-
Junta de ala izquierda 1, 2	Impresión 3D	-
Junta de ala derecha 1, 2	Impresión 3D	-
Articulación de ala 1, 2 x2	Impresión 3D	-

Fuente: Elaboración Propia

Las varillas a utilizar vienen en unidades de 500 mm de longitud. El sistema requiere varillas de 310, 260, 200, 150, 115, 110, 90, 70 y 30 para una sola ala y 200, 200, 150, 150, 50 y 50 para la cola. La opción óptima es cortar 7 varillas de 500 mm en 24 partes, que incluye el primer grupo, las varillas 310 y 150; el segundo grupo de 260, 200 y 30; y el tercer grupo, las varillas 150, 130, 115 y 90. Esta operación se repite 2 veces. El último grupo de 110, 100, 70, 70, 50 y 50. Dado que la sección transversal de estas varillas es muy pequeña, los cortes se podrán realizar fácilmente con una amoladora.

Mientras que el corte para la estructura de soporte se podrá realizar mediante un corte CNC, debido a la forma particular del mismo. Por otro lado, el corte requerido para el fuselaje inferior, fuselaje superior y la membrana que cubre la estructura de ala se podrá realizar mediante corte con alambre de calor.

Adicionalmente, la unión que existe entre las juntas y las varillas de fibra de carbono, la unión de la articulación con la estructura de ala y la integración del fuselaje superior e inferior con la estructura de soporte puede ser reforzada mediante la aplicación de un adhesivo epoxi bicomponente.

#### **4.2 Diseño electrónico/eléctrico**

En este apartado se trabajará el diseño eléctrico/electrónico del concepto de solución seleccionado. El diagrama presentado en la Figura 4.15 se detallan las conexiones entre los diversos componentes electrónicos. La energía del sistema es proporcionada por la batería de litio-polímero (LiPo), que irá conectada a un módulo de potencia que dispone de un sensor de voltaje y corriente, el cual a su vez transmitirá la información del estado de la batería al controlador de vuelo. El controlador de vuelo es alimentado por el módulo de potencia, alimenta y se comunica con un módulo GPS, lo que le permite conocer su ubicación en todo momento, además se comunicará con el controlador electrónico de velocidad (ESC) para controlar la velocidad del motor DC. Los servomotores son alimentados por el regulador de voltaje del ESC y comunicado con el controlador de vuelo. Finalmente, ambas cámaras se comunicarán y alimentarán con este último.

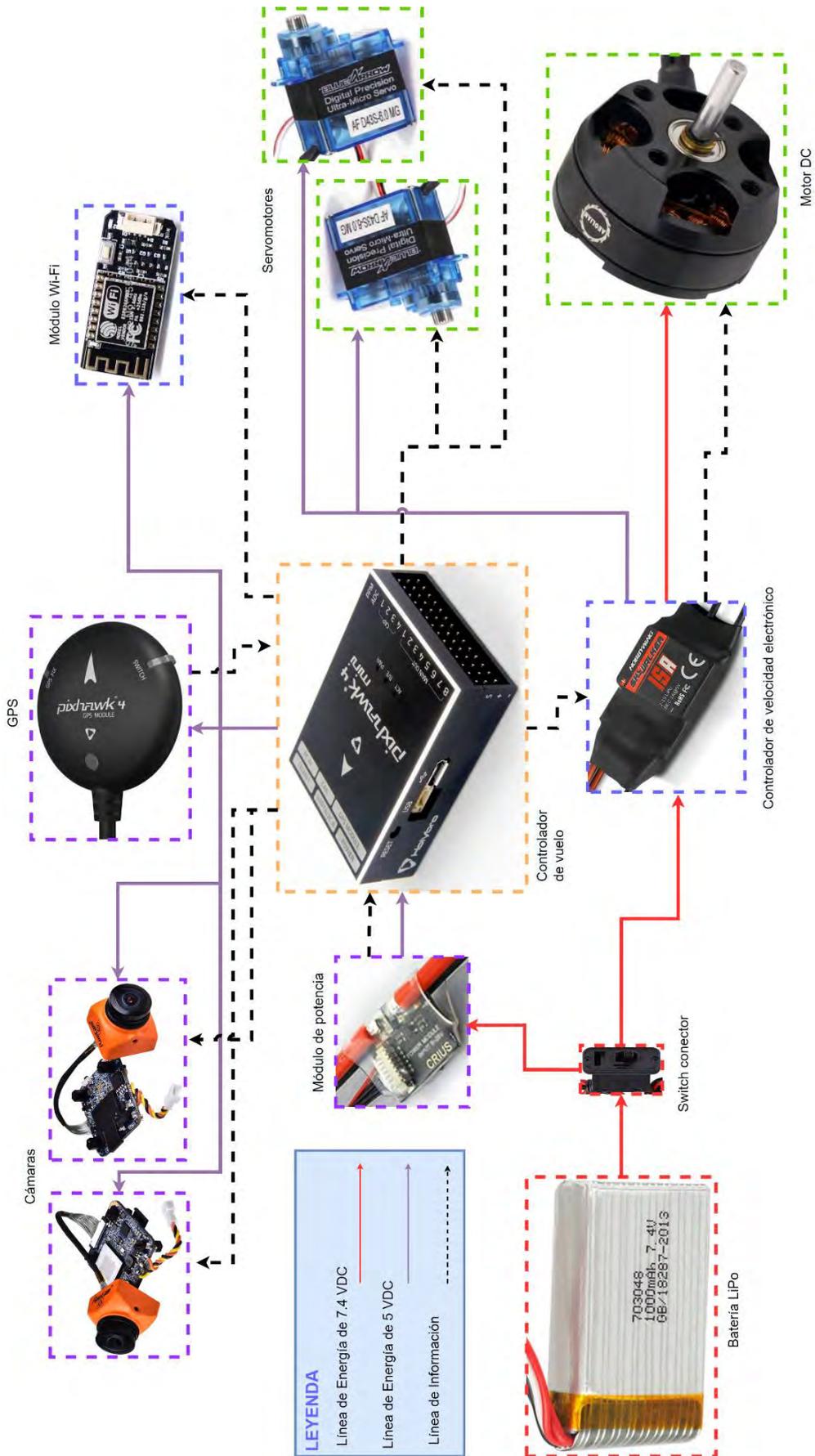


Figura 4.16: Diagrama de componentes (Fuente: Elaboración propia)

## 4.2.1 Módulo de sensores

Se detalla a continuación los elementos que conforman al módulo de sensores, así como sus principales características.

### 4.2.1.1 Cámara

El robot aéreo usará la cámara descrita a continuación para el registro visual de los arándanos en los arbustos mediante la captura fotográfica, la cual será almacenada en las tarjetas microSD de estos dispositivos. De acuerdo al diseño propuesto, se requiere el uso de micro cámaras para garantizar la masa reducida total del sistema. La cámara seleccionada es la RunCam Split 3 Micro, esta micro cámara permite capturar imágenes y/o videos a una alta tasa de cuadros por segundo (60 Hz); lo cual aumenta la velocidad de movimiento con que se puede grabar sin que las imágenes capturadas se vean distorsionadas por el desenfoque de movimiento. Su tamaño y masa reducida descritas en la Tabla 4.3 permiten que pueda integrarse al sistema propuesto.



Figura 4.17: RunCam Split 3 Micro

Fuente: RunCam<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> RunCAM. (s.f.). RunCam Split 3 Micro. Obtenido de <https://shop.runcam.com/runcam-split-3-micro-and-split-3-nano/>

Tabla 4.3: Datos técnicos RunCam Split 3 Micro

Datos Técnicos	
Resolución óptica	1080p
Cuadros por segundo	60 fps
Fuente de alimentación	5 – 20 VDC
Tamaño	19×20×19 mm
Peso	13.5 g
Interfaz de montaje	Montura plástica estándar para base

Fuente: RunCam<sup>10</sup>

#### 4.2.1.2 Módulo de potencia (sensor de voltaje y corriente)

Conocer en qué estado se encuentra la batería es fundamental para aplicaciones autónomas, ya que el sistema debe ser capaz de llegar a su lugar de destino con la suficiente energía para lograrlo. Actualmente, los sensores de voltaje y corriente para aplicaciones de vehículo aéreo no tripulado se encuentran integrados dentro de un módulo de potencia, el cual permite regular el voltaje que posee la batería y suministra el voltaje permitido por el controlador de vuelo. De esa manera, se dispone de un componente integrado con una funcionalidad adicional para el desempeño óptimo del sistema. El módulo de potencia seleccionado es el Holybro PM02 v3, de acuerdo a la información descrita en la Tabla 4.4 permiten que pueda integrarse al sistema propuesto.



Figura 4.18: Módulo de potencia Holybro PM02 v3

Fuente: Holybro<sup>11</sup>

<sup>10</sup> RunCAM. (s.f.). RunCam Split 3 Micro. Obtenido de <https://shop.runcam.com/runcam-split-3-micro-and-split-3-nano/>

<sup>11</sup> Holybro. (s.f.). PM02 V3. Obtenido de <http://www.holybro.com/product/power-modulepm02-v3/>

Tabla 4.4: Datos técnicos módulo de potencia Holybro PM02 v3

Datos Técnicos	
Voltaje de entrada máximo	51 VDC (12s LiPo)
Corriente de entrada máxima	120 A
Voltaje de salida del regulador	5 VDC
Corriente de salida del regulador	3 A
Tamaño	15×15×3 mm
Peso	20 g

Fuente: Holybro<sup>12</sup>

#### 4.2.1.3 Controlador de velocidad electrónico (ESC)

El robot aéreo utilizará un motor DC sin escobillas cuyas velocidades serán controladas a partir de señales moduladas por ancho de pulsos (PWM). Actualmente, existen muchos de estos componentes en el mercado que las generan especialmente para este tipo de motores, tomando en consideración el amperaje máximo soportado por el motor, el voltaje otorgado por la batería, tiempo de respuesta de aceleración, entre otros. Por consiguiente, se ha escogido el circuito Skywalker ESC 15, puesto que su voltaje de entrada puede trabajar con el voltaje otorgado por la batería de 7.4 VDC (véase Tabla 4.11) y la corriente máxima que entrega está por encima del amperaje nominal máximo que los motores consumen (en este caso 15.8 A, véase Tabla 4.7). Por otro lado, el componente descrito está integrado con un circuito de reducción de voltaje y corriente (BEC) (véase Tabla 4.5), el cual permite reducir ambos niveles otorgados por la batería, para que esta misma pueda ser utilizada también por otros componentes (servomotores). La funcionalidad descrita es para eliminar la necesidad de incluir una batería adicional solamente para estos elementos, logrando un robot más ligero.

<sup>12</sup> Holybro. (s.f.). PM02 V3. Obtenido de <http://www.holybro.com/product/power-modulepm02-v3/>



Figura 4.19: Controlador de velocidad electrónico Skywalker ESC 15

Fuente: Hobbywing<sup>13</sup>

Tabla 4.5: Datos técnicos controlador de velocidad electrónico Skywalker ESC 15

Datos Técnicos	
Voltaje de entrada	7.4 – 11.1 VDC (2-3s LiPo)
Corriente continua	15 A
Corriente máxima	20 A
Voltaje BEC	5 VDC
Corriente BEC	2 A
Tamaño	48×22.5×6 mm
Peso	16.5 g

Fuente: Hobbywing<sup>13</sup>

#### 4.2.1.4 Módulo de localización

Conocer la ubicación y orientación del robot aéreo es imprescindible, pues debe ser capaz de desplazarse hacia las ubicaciones en donde deba realizar las tareas con que se le ha programado. Por lo tanto, para aplicaciones en exteriores lo más eficaz es usar GPS, ya que este sensor sólo utiliza un receptor de las señales de los satélites y en base a estas calcula su ubicación. Asimismo, es una alternativa más sencilla, puesto que otros métodos por lo general son más

<sup>13</sup> Hobbywing. (s.f.). Skywalker ESC 15. Obtenido de <http://www.hobbywing.com/goods.php?id=407>

complejos de implementar debido al uso de una cantidad mayor de sensores y un mayor procesamiento.

Se ha seleccionado el módulo Pixhawk 4 GPS, puesto que su precisión de 2.5 metros (véase Tabla 4.6) en la coordenada de inicio de vuelo no afectará al sistema ni al desempeño en el vuelo del robot aéreo. Asimismo, los criterios adicionales para su selección han sido que el módulo dispone de un compás integrado que le permite conocer su orientación y la extensa cantidad de documentación sobre su uso con el controlador de vuelo Pixhawk.



Figura 4.20: Módulo Pixhawk 4 GPS

Fuente: Holybro<sup>14</sup>

Tabla 4.6: Datos técnicos módulo Pixhawk 4 GPS

Datos Técnicos	
Frecuencia de actualización	5 Hz
Precisión de posición horizontal	2.5 m
Precisión de velocidad	0.05 m/s
Tamaño	Ø 50×26 mm
Peso	32 g

Fuente: Holybro<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Holybro. (s.f.). Pixhawk 4 GPS Module. Obtenido de <http://www.holybro.com/product/pixhawk-4-gps-module/>

## 4.2.2 Módulo de actuadores

Se detalla a continuación los elementos que conforman al módulo de actuadores, así como sus principales características.

### 4.2.2.1 Motor DC

Los robots aéreos tipo ave son impulsados por motores DC generalmente sin escobillas debido a su baja complejidad de implementación. Para la selección del motor se ha utilizado la ecuación (7) que permite relacionar sus características con los requerimientos del diseño mecánico del apartado inicial.

$$T_{max} = \frac{30P}{\pi \times rpm} \quad (7)$$

En donde  $T_{max}$  corresponde al torque máximo ejercido por el motor,  $P$  a la potencia del motor y  $rpm$  a la velocidad expresada en revoluciones por minuto a la salida del mecanismo de reducción. Se ha escogido el motor DC sin escobillas Turnigy L2210C-1200, debido a que sus características de potencia de 150 W y 1200 KV (véase Tabla 4.7) permitirán cumplir con el requerimiento mecánico. El valor expresado en KV se refiere a la constante de revoluciones de un motor, en resumen, el número de revoluciones por minuto (rpm) que será capaz de ofrecer cuando se le aplique 1 V (un voltio). Por consiguiente, al aplicar el voltaje de 7.4 V se obtiene 8880 rpm; luego al aplicar el valor de reducción de 0.034375 hallado anteriormente, se obtiene un valor de 305.25 rpm, que tomando en cuenta la eficiencia se aproxima a un valor de 300 rpm. Finalmente, con ambos valores nos entrega un torque máximo de 4.77 Nm, lo que resulta en un valor mucho mayor que el torque máximo necesario para el aleteo (0.045 Nm). Asimismo, la frecuencia de aleteo corresponde a 5 Hz, un valor aproximado al recomendando de 4.963 Hz, calculado en el apartado inicial de este capítulo.



Figura 4.21: Motor DC sin escobillas Turnigy L2210C-1200

Fuente: Turnigy<sup>15</sup>

Tabla 4.7: Datos técnicos motor DC sin escobillas Turnigy L2210C-1200

Datos Técnicos	
KV	1200
Voltaje de entrada	7.4 – 11.1 VDC (2-3s LiPo)
Corriente continua máxima	15.8 A
Potencia continua máxima	150 W
Tamaño	Ø 28×25 mm
Peso	48 g

Fuente: Turnigy<sup>15</sup>

#### 4.2.2.2 Servomotores

La acción de balanceo y maniobrabilidad de los robots aéreos tipo ave es realizada por accionamiento de la cola por medio de servomotores, ya que ellos permiten mantener el ángulo de giro. Como se vio en el apartado inicial del presente capítulo, el torque mínimo para la maniobrabilidad equivale a 0.0165 Nm. Por lo cual se ha seleccionado el servomotor Blue Arrow 3G, el cual posee un torque 0.5 kg-cm (0.049 Nm) (véase Tabla 4.8) lo que resulta en un mayor valor, garantizando el funcionamiento correcto del sistema.

<sup>15</sup> Turnigy. (s.f.). Turnigy L2210C-1200 Brushless Motor. Obtenido de <http://www.turnigy.com/motors/sk3/>



Figura 4.22: Servomotor Blue Arrow 3G

Fuente: Hobbyking<sup>16</sup>

Tabla 4.8: Datos técnicos servomotor Blue Arrow 3G

Datos Técnicos	
Voltaje de entrada	4.8 – 6 VDC
Velocidad de operación	0.1 s/60°
Torque máximo	0.5 kg-cm (0.049 Nm)
Tamaño	27.5×22×8 mm
Peso	3 g

Fuente: Hobbyking<sup>16</sup>

### 4.2.3 Controlador de vuelo

Actualmente, para realizar el control de vuelo de los vehículos aéreos no tripulados, es decir que puedan seguir una trayectoria deseada y con un vuelo estable, se utilizan circuitos especializados para tal propósito, puesto que se encuentra con facilidad y variedad en el mercado. Para garantizar lo anteriormente indicado, estas computadoras presentan componentes tales como IMU (unidad de medición inercial), controladores PID (control

<sup>16</sup> HobbyKing (s.f.). Blue Arrow High Speed Digital MG Micro Servo. Obtenido de [https://hobbyking.com/en\\_us/blue-arrow-3g-high-speed-digital-mg-micro-servo-50kg-06sec-60deg.html](https://hobbyking.com/en_us/blue-arrow-3g-high-speed-digital-mg-micro-servo-50kg-06sec-60deg.html)

proporcional, integral y derivativo), giroscopios, acelerómetros, entre otros. Además, permiten añadir otros componentes tales como telemetría, GPS, otras computadoras, y demás.

Se ha seleccionado el controlador de vuelo Pixhawk 4 mini, debido a su facilidad de conectarse con otros dispositivos como el GPS, el módulo de potencia que permite adicionalmente realizar el seguimiento al estado de la batería, comunicación con una computadora externa y tamaño reducido, entre otros (véase Tabla 4.9). Además, que puede configurarse fácilmente y al ser uno de los más populares presenta gran cantidad de documentación. El Pixhawk 4 mini se puede configurar a través del software Mission Planner, el cuál es un software de código abierto en el que se pueden configurar el tipo de vehículo aéreo (Figura 4.24 izquierda), las ganancias del controlador PID (Figura 4.24 derecha), el modo de vuelo del Pixhawk 4 mini, entre otros. Por otro lado, amplia documentación de los desarrolladores de este controlador sobre cómo conectarlo y configurarlo para comunicarse con la computadora mediante el protocolo MAVLink.



Figura 4.23: Controlador de vuelo Pixhawk 4 mini

Fuente: Holybro<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Holybro. (s.f.). Pixhawk 4 Mini. Obtenido de <http://www.holybro.com/product/pixhawk4-mini/>



Figura 4.24: Selección del tipo de vehículo aéreo en Mission Planner (izquierda), configuración de ganancias PID en Mission Planner (derecha) (Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 4.9: Datos técnicos controlador de vuelo Pixhawk 4 mini

Datos Técnicos	
Microprocesador	32 Bit Arm® Cortex®-M7
Frecuencia de operación	216 MHz
RAM	512 KB
FLASH	2 MB
Sensores	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acelerómetro/Giroscopio de 6 ejes Invensense ICM-20689</li> <li>- Acelerómetro/Giroscopio de 6 ejes Bosch BMI055</li> <li>- Magnetómetro de 3 ejes iSentek MS5611</li> <li>- Barómetro MEAS MS5611</li> </ul>
Periféricos	UART, CAN, puerto de telemetría, puerto USB, I2C, SPI, 8x PWM
Voltaje de entrada	4.75 – 5.5 VDC
Tamaño	38×55×15.5 mm
Peso	37.2 g

Fuente: Holybro<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Holybro. (s.f.). Pixhawk 4 Mini. Obtenido de <http://www.holybro.com/product/pixhawk4-mini/>

#### 4.2.4 Comunicación

Con la finalidad que se pueda realizar la comunicación entre el robot aéreo mientras se encuentre realizando su desplazamiento, la computadora que permite realizar la configuración de trayectoria y la acción de captura de imágenes y/o videos se requiere del uso de un elemento de bajo peso y una transmisión de información utilizando algún protocolo de comunicación estándar entre el sistema y la computadora. Por lo tanto, se ha seleccionado el módulo JJRC de telemetría Wifi de 2.4G, ya que su facilidad de conexión con el controlador de vuelo Pixhawk 4 Mini, la opción de realizar la comunicación mediante la ejecución de una aplicación en un teléfono móvil y el rango de alcance máximo de aproximadamente 250 metros (véase Tabla 4.10) lo convierte en una opción de fácil implementación e integración con el sistema.

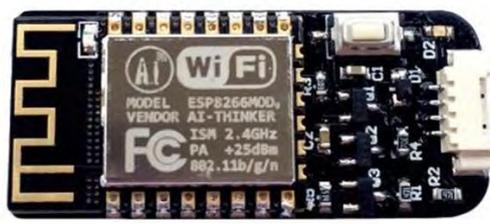


Figura 4.25: Módulo JJRC de telemetría Wifi de 2.4G

Fuente: AI Thinker<sup>19</sup>

Tabla 4.10: Datos técnicos módulo JJRC de telemetría Wifi de 2.4G

Datos Técnicos	
Voltaje de entrada	4 – 9 VDC
Rango de frecuencia	2.4 – 2.4835 GHz
Potencia de transmisión	19.5 dBm (aprox. 250 m)
Tamaño	18×39×5 mm
Peso	3 g

Fuente: AI Thinker<sup>19</sup>

<sup>19</sup> AI Thinker (s.f.). IoT Module ESP-12E. Obtenido de [http://www.ai-thinker.com/pro\\_view-59.html](http://www.ai-thinker.com/pro_view-59.html)

#### 4.2.5 Suministro de energía

La selección y dimensionamiento final de la batería toma en consideración las corrientes de operación de todos los componentes. Algunas de ellas corresponden a valores máximos de aproximación tomando en cuenta que están en funcionamiento durante todo el ciclo de operación. Por otro lado, la corriente que utiliza el motor DC es calculada mediante la ecuación (8), en donde T corresponde al torque que ejerce el motor para accionar el mecanismo de alabateante, V al voltaje suministrado al motor y rpm a la velocidad expresada en revoluciones por minuto a la salida del mecanismo de reducción. Ambos valores han sido calculados anteriormente, en donde se obtiene un valor de 0.216 A, que para efectos del cálculo siguiente se tomará como 0.3 A.

$$I_{motor} = \frac{\pi \times rpm \times T}{30 \times V} \quad (8)$$

La corriente total que suministra la batería es calculada por la siguiente ecuación (9), en donde  $I_{motor}$  posee un valor de 0.3 A,  $I_{cámara}$  un valor de 0.4 A,  $I_{servo}$  un valor de 0.5 A y  $I_{controlador}$  un valor de 2 A, el cual incluye todos los demás componentes. Todo ello resulta en un valor de 4.1 A.

$$I_{total} = I_{motor} + 2 \times I_{cámara} + 2 \times I_{servo} + I_{controlador} \quad (9)$$

Por lo tanto, se ha seleccionado la batería de LiPo PULSE 860mAh, puesto que el voltaje de 7.4V, sus dimensiones y su peso reducido (véase Tabla 4.11) lo convierte en un elemento que se encuentra dentro de los límites establecidos en los requerimientos del sistema.

Finalmente, el tiempo de duración del sistema resulta de la división entre la capacidad de la batería y la corriente de operación total, lo que resulta en un tiempo de 0.209 horas (12.58

minutos). Tomando en cuenta que la batería no puede estar a menos del 20% de su capacidad, se tendrá un tiempo de vuelo efectivo de 10 minutos, lo cual se ajusta a los requerimientos del robot aéreo.



Figura 4.26: Batería de LiPo PULSE 860mAh

Fuente: Pulse Battery<sup>20</sup>

Tabla 4.11: Datos técnicos batería de LiPo PULSE 860mAh

Datos Técnicos	
Voltaje de entrada	7.2 VDC (2S)
Capacidad	860 mAh
Ratio de descarga	15 C
Ratio de carga	5 C
Tamaño	57×13×30 mm
Peso	50 g

Fuente: Pulse Battery<sup>20</sup>

### 4.3 Diseño de control

En esta sección se mostrarán y explicarán la integración del sistema control y diagramas de flujo, el cual por medio del controlador de vuelo se puede manipular las variables de velocidad del motor y posición de servomotores, de esa manera controlar la variable de trayectoria de vuelo del robot aéreo.

<sup>20</sup> Pulse Battery. (s.f.). PULSE 860mAh 15C 7.4V 2S Receiver LiPo Battery - EC3 Connector. Obtenido de <https://www.pulsebattery.com/products/pulse-860mah-2s-7-4v-rx-jr-and-ec3-lipo-battery>

### 4.3.1 Integración del sistema de control

El robot aéreo será controlado desde un software ejecutado en una laptop o PC, a la cual estará conectado mediante el protocolo de comunicación wifi. Como se mencionó previamente, el software a utilizar será el Mission Planner. Este software de uso libre cuenta con una configuración especial para el tipo de vehículo aéreo no tripulado que se propone, el cual es semejante al de un ala volante. Este programa permite monitorear el estado del robot aéreo durante su operación y tiene una interfaz para laptop o PC donde muestra los parámetros de vuelo tales como: velocidad, inclinación, posición, así como también el uso de la cámara, batería restante, entre otros. Además, puede ser utilizado desde los sistemas operativos Windows o Mac OS y permitir el control manual del vuelo del robot. La comunicación de lo que comúnmente se denomina estación en tierra para el intercambio de comandos e información de control y telemetría es por medio del protocolo MAVLink. Por último, para la captura de imágenes y/o videos, el software permite enviar la señal al controlador para realizar dicha acción independientemente del estado de movimiento del robot aéreo, así como la indicación si es una captura puntual o una colección en un intervalo de tiempo. (ArduPilot, 2020).



Figura 4.27: Esquema de comunicación. (Fuente: Elaboración Propia)

### 4.3.2 Diagramas de flujo

Los diagramas de flujo del robot aéreo se presentan en este apartado con una explicación de cada uno de ellos. Están compuesto por un programa principal y una rutina de interrupción. Estos diagramas deberán ser utilizados como pauta para programar la secuencia de control del robot aéreo en el Mission Planner. El diagrama de la Figura 4.27 corresponde al programa de control principal. Este será el algoritmo central y al cual el sistema accederá primero para realizar cualquier rutina. Luego se muestra la Figura 4.28 que corresponde al algoritmo de la rutina de interrupción del sistema.

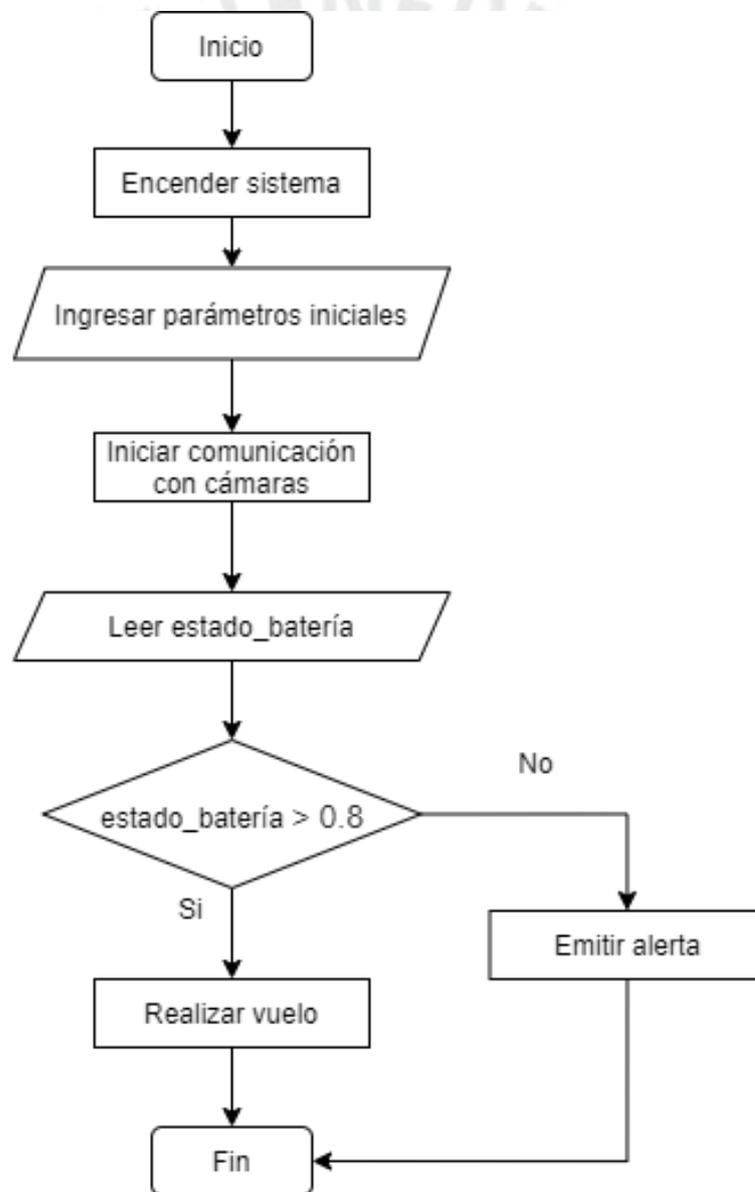


Figura 4.28: Diagrama de flujo del programa principal (Fuente: Elaboración propia)

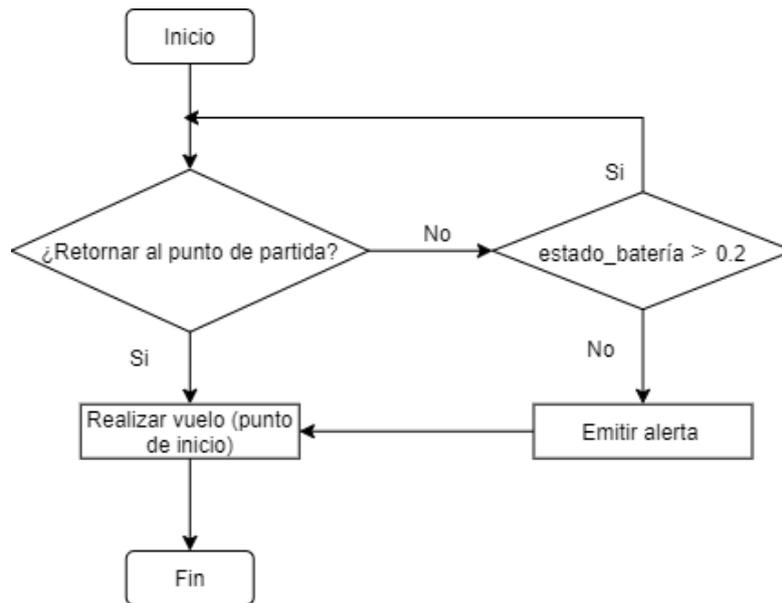


Figura 4.29: Diagrama de flujo de la rutina de interrupción (Fuente: Elaboración propia)

La primera instrucción que recibe el sistema para comenzar el vuelo del robot aéreo incluye la configuración de parámetros iniciales, como la señal de inicio de vuelo (iniciada manualmente mediante un interruptor) y la trayectoria. Asimismo, comprobar que existe una comunicación con las cámaras. A continuación, se comprueba el nivel de la batería y se introduce dentro de un bloque condicional, donde, si el nivel de la batería es inferior del 80%, el robot aéreo no iniciará el recorrido. Por lo que, el operario debe recargar la batería y reiniciar el sistema. Si el nivel de la batería es superior al 80% la rutina prosigue y la ruta de vuelo se ejecuta según lo indicado por el operario. La rutina termina cuando ha finalizado el recorrido indicado.

La secuencia de interrupción comienza en el momento en el que el usuario activa la señal secundaria de retorno al punto de partida o si el nivel de la batería es inferior del 20%. La rutina prosigue con el recorrido del vuelo de regreso al punto de partida. Esto hace que el robot aéreo realice su trayectoria en dirección inversa, regresando a su ubicación inicial de despegue.

## **CAPÍTULO 5: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

En el presente capítulo se abordarán las pruebas y simulaciones del algoritmo de identificación de estado de madurez de arándanos, que para el presente trabajo identificará solo dos estados, maduro y no maduro. Para lograr dicho objetivo, inicialmente se realizará un análisis del marco de implementación, que incluye la selección del conjunto de entrenamiento, los modelos y arquitecturas de línea de base. Así como también, la información detallada del tipo de imagen obtenida por el robot aéreo. Finalmente, con lo descrito, desarrollar el algoritmo de identificación.

### **5.1 Marcos de implementación**

En la actualidad existe una gran cantidad de entornos de trabajo para aplicaciones de aprendizaje profundo. Entre los más utilizados se encuentran TensorFlow, Caffe, Theano, Keras o PyTorch. Para el caso del algoritmo de identificación a desarrollar se hará el uso en concreto de dos: Tensorflow y Keras, puesto que son los más versátiles al ofrecer la mayor cantidad de herramientas que permiten simplificar considerablemente las implementaciones y facilitan una integración más directa con otras plataformas como OpenCV. Adicionalmente, cada uno de estos entornos emplea el lenguaje de programación de alto nivel interpretado Python como interfaz de programación, lo que lo convierte en el escenario con mayor extensión para el desarrollo de aplicaciones de aprendizaje automático.

Para conseguir resultados aceptables en el desarrollo de la resolución de problemas de aprendizaje profundo es necesario un modelo complejo, el cual, para un entrenamiento desde

ceros, requiere tanto el uso considerable de recursos (GPUs) como de tiempo (días e incluso semanas de entrenamiento, dependiendo del modelo y del número de GPUs utilizadas). Por lo tanto, para abordar el problema actual de manera efectiva, se utilizará el aprendizaje por transferencia, el cual permite la reutilización del conocimiento adquirido durante el desarrollo de la resolución de un problema concreto y su posterior aplicación como parte inicial de la solución a uno nuevo, de diferente índole, pero fuertemente relacionado. Esta forma de implementación consiste en emplear una CNN (red neuronal convolucional) entrenada previamente con una base de datos determinada, a la cual se le elimina la última capa totalmente conectada, para luego introducir en su lugar un clasificador con un nuevo conjunto de datos. De esta manera, la red original solamente funciona como un extractor fijo de características, mientras que el predictor insertado posibilita una clasificación en particular.

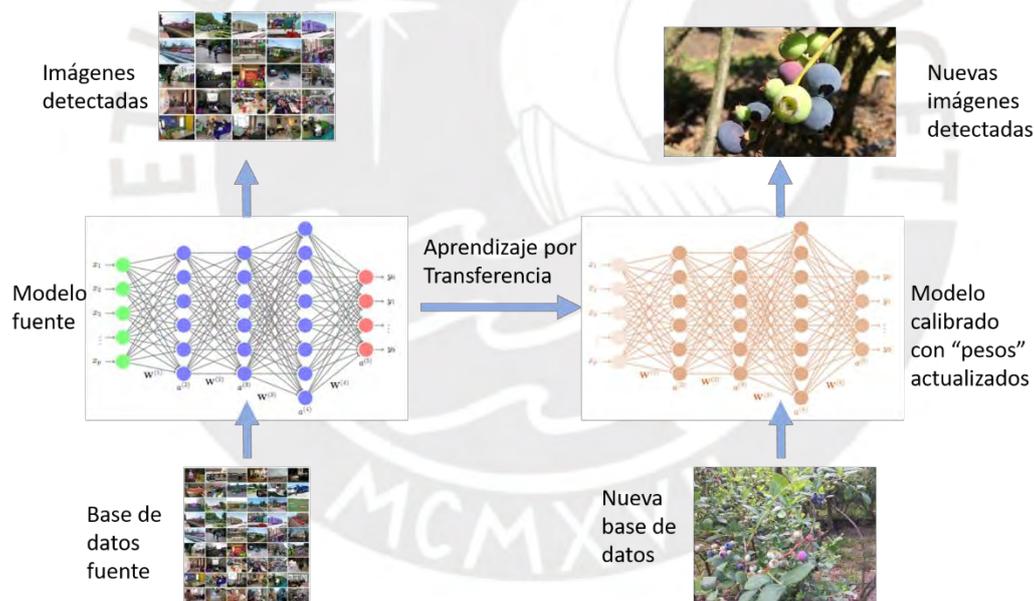


Figura 5.1: Diagrama del proceso para el Aprendizaje por Transferencia (Fuente: Elaboración propia)

Por consiguiente, en el proceso de desarrollo del algoritmo de identificación del estado de madurez de arándanos se emplea la data Blueberry-V1 del artículo “Deepblueberry: Quantification of Blueberries in the Wild Using Instance Segmentation Dataset” (Gonzales et al., 2019). Esta base de datos consiste en un conjunto de 170 imágenes de arándanos en los

arbustos y sus características están descritas en la Tabla 5.1, las cuales serán similares a las capturadas por el robot aéreo. Los arándanos se anotaron para su detección con un cuadro delimitador (bounding box). La anotación del objeto se realiza por coordenadas para ser leídas por el algoritmo Mask R-CNN, el cual se utilizará como línea de base para el desarrollo del algoritmo descrito en el siguiente apartado.

Tabla 5.1: Descripción de las características de la imagen

Características de imagen	
Alto	1920 píxeles
Ancho	1080 píxeles
Mapa de colores	RGB
Formato	JPG
Iluminación	Luz natural durante el día
Oclusiones	Parciales y totales
Barrido	Progresivo

Fuente: Elaboración propia

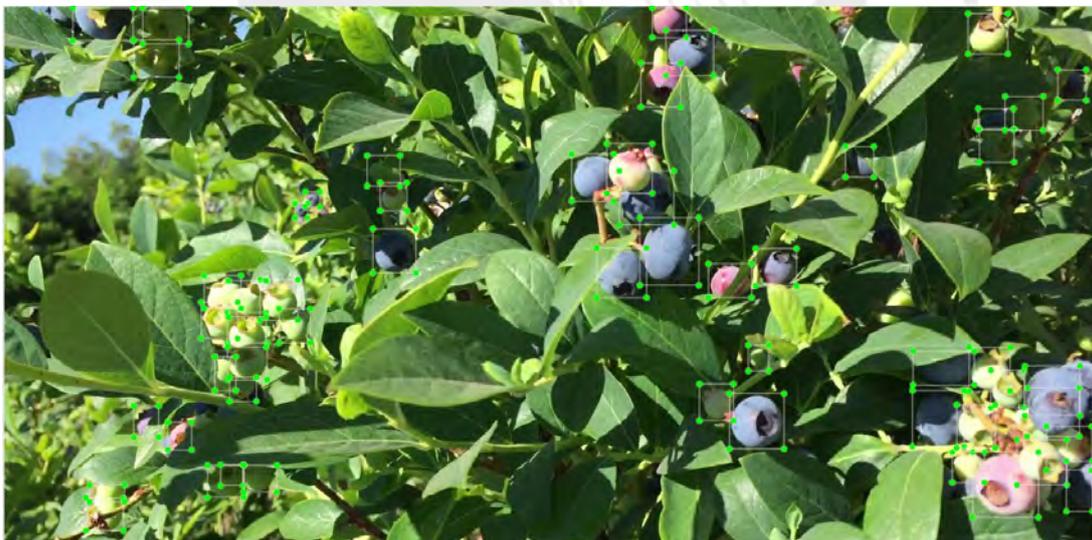


Figura 5.2: Imagen tipo del conjunto de datos con la detección del cuadro delimitador (Fuente: Elaboración propia)

De acuerdo a lo descrito anteriormente, para garantizar que las imágenes del conjunto de base de datos sea similar a las imágenes que captara la cámara del robot aéreo, se detallará el campo de visión tomando en cuenta las características de distancia focal, tamaño del sensor y ubicación.

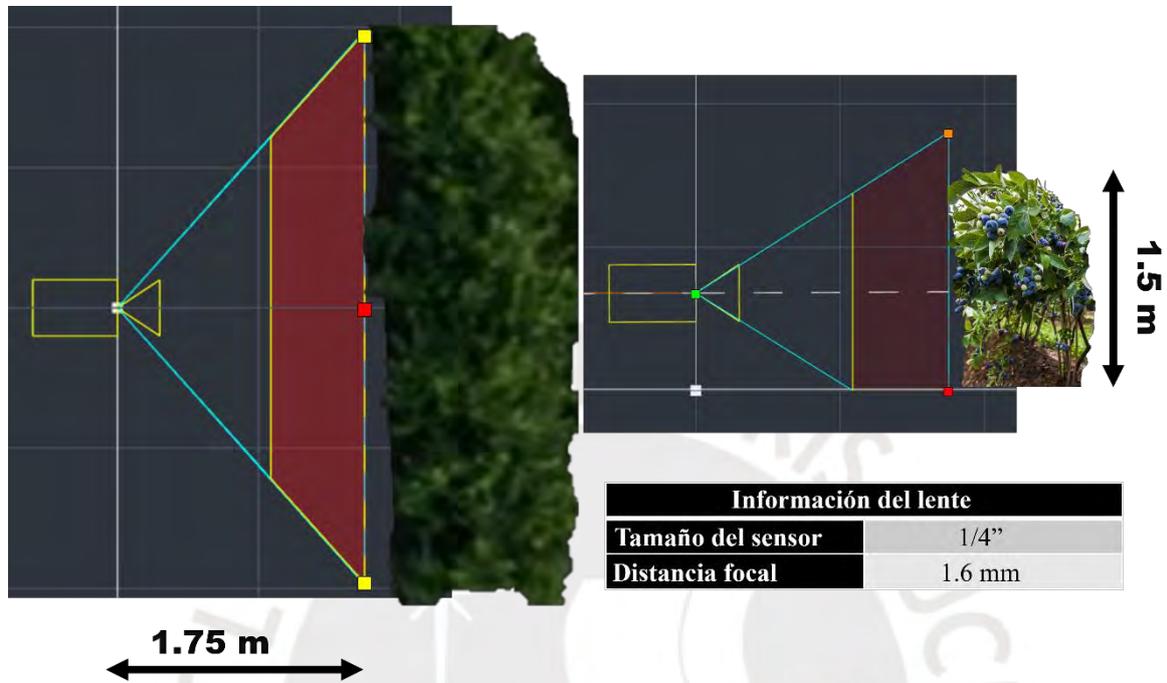


Figura 5.3: Campo de visión de la cámara del robot aéreo (Fuente: Elaboración propia)

## 5.2 Algoritmo de identificación

El algoritmo a implementar utiliza como línea de base para el aprendizaje por transferencia el algoritmo de segmentación de instancias basado en Mask R-CNN (He, Gkioxari, Dollár y Girshick, 2017). Este algoritmo ha sido entrenado utilizando la base de datos COCO que contiene imágenes de diferentes clases como objetos de ciudades, muebles, frutas, entre otros. Las únicas frutas incluidas en esa base de datos son plátanos, manzanas y naranjas. La arquitectura de red convolucional seleccionada es la ResNet50, ya que permite generar máscaras pequeñas, lo cual es útil para detectar arándanos pequeños en la imagen. El algoritmo a implementar incluye un paso adicional que permite realizar el conteo de número de arándanos maduros y no maduros segmentados en cada imagen, lo cual con la integración total del sistema puede utilizarse para mejorar la gestión del proceso de recolección.

### 5.2.1 Arquitectura de red

El algoritmo de detección de instancias propuesto se basa en el algoritmo Mask R-CNN. La arquitectura de esta red está conformada por bloques, en donde el primero es una CNN estándar que sirve como característica extractora, mientras el segundo bloque es una pirámide de extracción de características que agrega las características de alto nivel del primer bloque y los pasa a las capas inferiores. Las primeras capas de estas CNN permiten detectar características de bajo nivel (bordes y esquinas) y capas posteriores detecta sucesivamente características de nivel superior (arándanos y hojas). Al pasar a través de la red, la imagen se convierte de 1920, 1080, 3 (RGB) a un mapa de características de forma 32, 32, 2048. Este mapa de características se convierte en la entrada para las siguientes etapas. De esta manera permite activar funciones en todos los niveles para tener acceso a características de nivel superior. Esta parte de la arquitectura permite la detección de arándanos pequeños en la imagen.

Posteriormente, se ejecuta la región de interés, la cual consiste en escanear el mapa de características de la red, lo cual permite que las características extraídas puedan ser reutilizadas de manera eficiente y por lo tanto evitar cálculos duplicados. Luego, se divide en dos etapas con una red profunda en cada una de ellas, la función de la primera tiene la capacidad de clasificar las regiones para las clases definidas, así como el fondo. La segunda corresponde al cuadro delimitador, que recorta una parte de un mapa de características y lo cambia de tamaño fijo; su propósito es refinar el ubicación y tamaño del cuadro delimitador que encapsula al objeto.

Finalmente, la etapa de la red de máscara de segmentación consiste en tomar las regiones positivas seleccionadas por la región de interés y generar máscaras para ellos. Durante el entrenamiento, las máscaras se reducen a diferentes tamaños para calcular la pérdida. El resultado obtenido por esta etapa no genera mucha relevancia, ya que lo importante para el objetivo propuesto es la detección del objeto dentro de un delimitador.

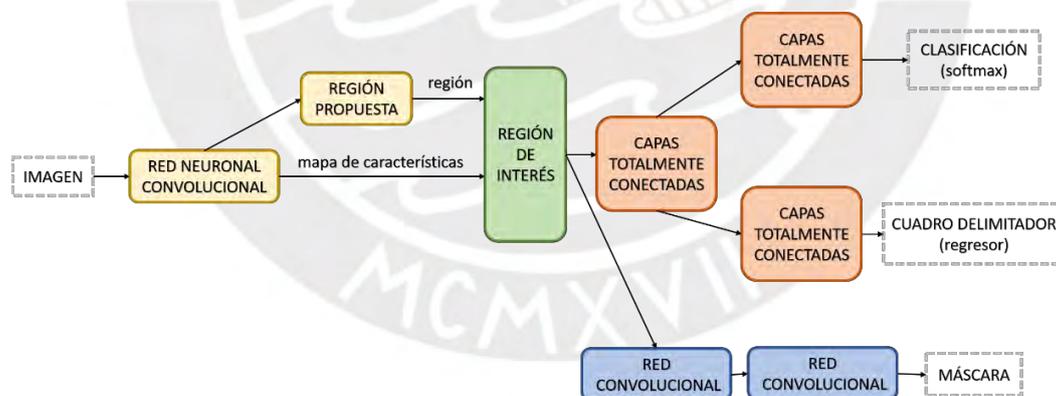


Figura 5.4: Diagrama de arquitectura de red Mask RCNN (Fuente: Elaboración propia)

### 5.2.2 Métricas de evaluación

Para evaluar el algoritmo propuesto se utiliza la métrica de la medida de intersección sobre la medida de la unión (IoU) para cada objeto. Esta métrica mide cómo gran parte del límite generado por la predicción del algoritmo se superpone con la delimitación del objeto inicial

(Nielsen, 2015). Actualmente, para un conjunto de datos se utiliza la precisión media (mAP) para evaluar el rendimiento de detección, que mide el producto de la precisión y la exhaustividad cuando un verdadero positivo se encuentra por encima de un umbral de IoU, generalmente mayor a 0.5. Así como también las gráficas de entrenamiento de la función de pérdida para el clasificador y el cuadro delimitador.

$$\text{IoU} = \frac{\text{Área de intersección}}{\text{Área de unión}}$$


Figura 5.5: Figura que detalla la métrica IoU para efectos del algoritmo (Fuente: Elaboración propia)

### 5.2.3 Identificación del estado de madurez

El algoritmo de identificación del estado de madurez concluye con la clasificación por estado de madurez de los arándanos identificados en una imagen. Este algoritmo identifica los colores más representativos en la imagen mediante el uso del algoritmo de agrupamiento K-means de intensidades de píxeles en una imagen RGB (Nielsen, 2015). La madurez se detecta si la intensidad del canal azul es el más representativo que los otros canales y en el caso contrario si el canal más representativo es el verde. El algoritmo de agrupamiento se encuentra como método integrado en la plataforma de Open CV.



Figura 5.6: Figura de colores predominantes en una imagen general que captura el robot aéreo (Fuente: Elaboración propia)

### 5.2.4 Experimentos y resultados

Para encontrar el mejor algoritmo de identificación del estado de madurez de arándanos se apuntó a utilizar los hiperparámetros adecuados para la detección que utiliza el algoritmo Mask R-CNN. Todos los experimentos se realizaron utilizando las 170 imágenes del conjunto de datos descritos inicialmente en el entorno de Google Colab, un servicio en la nube basado en los Notebooks de Jupyter, que permite el uso gratuito de las GPUs y TPUs de Google. El entrenamiento de una época tiene una duración de 5 minutos utilizando la herramienta indicada y el código se encuentra alojado con el siguiente repositorio en github: “Blueberry Ripe” para discusión y retroalimentación con la comunidad. A partir de un entrenamiento de 60 épocas, se obtuvo los resultados que se muestran en la Figura 5.7, la identificación del estado de madurez se realiza mediante la etiqueta “ripe” para maduros y “unripe” para no maduros, realizada posteriormente por el algoritmo K-means.



Figura 5.7: Ejemplos de identificación de arándanos. Las imágenes originales se muestran a la derecha, y los arándanos identificados por estado de madurez resultantes a la izquierda. (Fuente: Elaboración propia)

El resultado del entrenamiento omite aquellos objetos identificados con un score menor al 85% y la máscara de segmentación, ya que para efectos del objetivo no es relevante. Por lo tanto, en base a la métrica utilizada del IoU para validar cada arándano encontrado en cada imagen, se utiliza la métrica de precisión media (AP) que mide el área bajo la curva de precisión-exhaustividad de cada imagen.

Por consiguiente, para evaluar el resultado por cada época y observar la evolución del entrenamiento, se realiza la evaluación del conjunto de validación para cada época a través de la media de cada AP obtenido en cada imagen (Zhang y Zhang, 2009). Los resultados se muestran en la Figura 5.8, que es una gráfica que representa lo descrito en líneas anteriores, en el cual el valor obtenido de la media AP en la última época de entrenamiento corresponde a un valor aproximado del 92%.

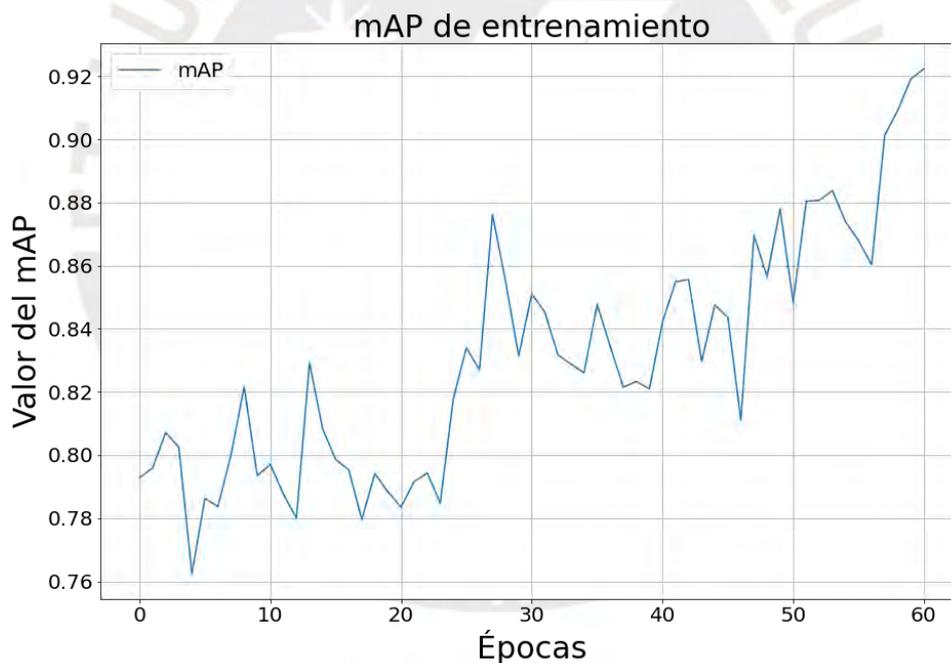
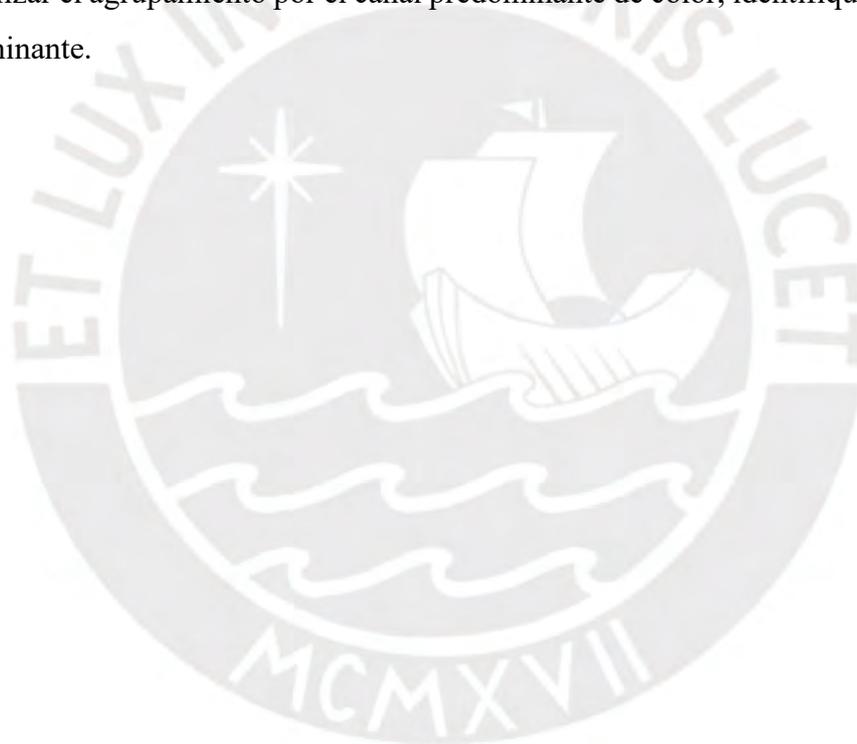


Figura 5.8: Evolución del entrenamiento del modelo. (Fuente: Elaboración propia)

De acuerdo a lo mostrado en la Figura 5.8, la evolución del algoritmo solo incluye el desempeño en la etapa de identificar los arándanos en las imágenes sin haber realizado la clasificación de maduro o no maduro. Posteriormente, utilizando las 170 imágenes de la base de datos descrito en la Tabla 5.1, el algoritmo de agrupamiento K-means permite clasificar el estado de madurez de cada arándano identificado en una imagen.

Finalmente, para encontrar el desempeño general de este algoritmo, se cuantificará todos los arándanos identificados en todas las imágenes. De esta manera, utilizando el conjunto total de 170 imágenes se encontró que, fueron identificados correctamente 4576 arándanos entre maduros y no maduros, a su vez no se identificaron un total de 388 arándanos. Con lo cual, se puede apreciar que los resultados indican que la precisión del algoritmo K-means alcanza un valor del 93%. Una colección de ejemplos de imágenes donde se puede apreciar el desempeño del algoritmo indicando la cantidades identificadas se puede encontrar en el Anexo 4. Algunos arándanos identificados son erróneamente clasificados, en los cuales clasifica arándanos no maduros como maduro. Ello se debe a que, existen situaciones de generación de sombras en los arándanos identificados, lo que conlleva a que la mezcla de la sombra con el color verde, que indica el estado de no maduración, transformarse en otro color. Por lo que, el algoritmo K-means, al realizar el agrupamiento por el canal predominante de color, identifique el canal azul como predominante.



## CAPÍTULO 6: PLANOS Y COSTOS

En el presente capítulo se abordarán la enumeración del diagrama esquemático y los planos mecánicos del robot aéreo diseñado, así como la estimación de presupuesto para construir un prototipo, el cual se divide en costo de diseño y costo de fabricación.

### 6.1 Diagrama Esquemático

El diseño electrónico/eléctrico del robot aéreo requiere de un diagrama esquemático en donde se pueda observar la conexión entre cada componente que integra el sistema. Este se encuentra detallado en la siguiente tabla y añadido en el archivo de diagrama esquemático adjunto a este documento.

Tabla 6.1: Detalle de diagrama esquemático

N°	Detalle	Tipo	Plano
1	Diagrama Esquemático del Robot Aéreo	Diagrama Esquemático	E1 – A3

Fuente: Elaboración propia

## 6.2 Planos Mecánicos

El diseño mecánico del robot aéreo requiere de una serie de planos de fabricación y ensamblaje. Estos son listados en la siguiente tabla y se encuentran en el archivo de planos mecánicos adjunto a este documento.

Tabla 6.2: Lista de planos mecánicos

N°	Detalle	Tipo	Plano
1	Ensamble General	Ensamble	L01 – A1
2	Estructura de Soporte	Ensamble	L02 – A0
3	Cola - Ensamble	Ensamble	L03 – A2
4	Ala Izquierda - Ensamble	Ensamble	L04 – A2
5	Ala Derecha - Ensamble	Ensamble	L05 – A2
6	Cabeza - Ensamble	Ensamble	L06 – A3
7	Cabeza	Despiece	L07 – A3
8	Pico	Despiece	L08 – A4
9	Junta de Cola T	Despiece	L09 – A4
10	Junta de Cola X	Despiece	L10 – A4
11	Junta de Cola F	Despiece	L11 – A4
12	Junta de Ala 1	Despiece	L12 – A4
13	Junta de Ala 2	Despiece	L13 – A4
14	Junta de Ala Izquierda 1	Despiece	L14 – A4
15	Junta de Ala Izquierda 2	Despiece	L15 – A4
16	Junta de Ala F	Despiece	L16 – A4
17	Junta de Ala Derecha 1	Despiece	L17 – A4
18	Junta de Ala Derecha 2	Despiece	L18 – A4
19	Articulación de Ala 1	Despiece	L19 – A4
20	Articulación de Ala 2	Despiece	L20 – A4
21	Soporte de Servomotor	Despiece	L21 – A4
22	Varilla Cola 1	Despiece	L22 – A4
23	Varilla Cola 2	Despiece	L23 – A4
24	Varilla Cola 3	Despiece	L24 – A4
25	Varilla Ala 1	Despiece	L25 – A4

N°	Detalle	Tipo	Plano
26	Varilla Ala 2	Despiece	L26 – A4
27	Varilla Ala 3	Despiece	L27 – A4
27	Varilla Ala 4	Despiece	L28 – A4
29	Varilla Ala 5	Despiece	L29 – A4
30	Varilla Ala 6	Despiece	L30 – A4
31	Varilla Ala 7	Despiece	L31 – A4
32	Varilla Ala A	Despiece	L32 – A4
33	Varilla Ala B	Despiece	L33 – A4
34	Estructura de Cuerpo	Despiece	L34 – A4
35	Soporte de Ala	Despiece	L35 – A4
36	Sujetador de Soporte de Ala	Despiece	L36 – A4
37	Brazo de Servomotor	Despiece	L37 – A4

Fuente: Elaboración propia

### 6.3 Costos

La estimación de presupuesto para construir un prototipo del robot aéreo se detalla en los costos asociados al desarrollo de las tecnologías presentadas en este documento, los cuales se dividen en costo de diseño y costo de fabricación. La siguiente tabla muestra el costo total que incluye los montos de los costos descritos anteriormente, los cuales serán analizados a detalle más adelante. Adicionalmente, en caso se fabriquen varios prototipos, el costo total se verá modificado solamente por el incremento del costo de fabricación, debido a que el costo de diseño es un costo fijo.

Tabla 6.3: Costo total

Concepto	Costo (S/.)
Costo de diseño	3000.00
Costo de fabricación	2652.20
<b>Total</b>	<b>5652.20</b>

Fuente: Elaboración propia

### 6.3.1 Costos de diseño

Los costos asociados al diseño en general del robot aéreo se detallan en los costos asociados al diseño mecánico, electrónico/eléctrico y de control. Estos se resumen en la Tabla 6.4 y se analizarán posteriormente.

Tabla 6.4: Costos de diseño

Concepto	Costo (S/.)
Costo de diseño mecánico	900.00
Costo de diseño electrónico/eléctrico	600.00
Costo de diseño de control	600.00
Costo de programación	900.00
<b>Total</b>	<b>3000.00</b>

Fuente: Elaboración propia

La elaboración del diseño mecánico implica seleccionar e integrar los elementos mecánicos, el cual tuvo una duración de tres semanas con 30 horas en cada una. Al considerar el monto de S/. 10.00 por hora de diseño, el costo total asciende a S/. 900.00. Este costo cubre todo el proceso, desde la conceptualización de la solución hasta la elaboración de los planos mecánicos. Asimismo, la elaboración del diseño electrónico/eléctrico tomó dos semanas con 30 horas de trabajo en cada una. A la misma tasa de S/. 10.00 por hora, el costo total es de S/. 600.00. Este costo abarca el trabajo de diseño desde la conceptualización de la solución hasta la elaboración del diagrama esquemático. Por otra parte, la elaboración del diseño de control conlleva al desarrollo del diagrama esquemático y su integración, también tomó dos semanas con 30 horas de trabajo en cada una. A la misma tarifa horaria, el costo total del diseño de control es de S/. 600.00.

De igual forma se presentan los costos que conlleva al desarrollo del algoritmo de identificación. La siguiente tabla detalla los gastos relacionados a los trabajos de configuración y programación ineludibles para implementar el sistema de control del robot aéreo. Se ha tenido en cuenta una tarifa de S/. 10.00 por hora de programación para un individuo.

Tabla 6.5: Costos de programación

Tarea	Tiempo (horas)	Costo (S/.)
Desarrollo algoritmo de identificación	60	600.00
Configuración de software	05	50.00
Configuración para la comunicación wifi	10	100.00
Programación y configuración de vuelo	15	150.00
Total		900.00

Fuente: Elaboración propia

### 6.3.2 Costos de fabricación

Los costos asociados a la fabricación e implementación de las tecnologías utilizadas por el robot aéreo se detallan en este apartado. La Tabla 6.6 contiene un resumen con los diversos conceptos, los cuales posteriormente son detallados en las Tablas 6.7 y 6.8.

Tabla 6.6: Costos de fabricación

Concepto	Costo (S/.)
Costo de componentes estandarizados	1571.20
Costo de componentes no estandarizados	52.00
Costo de importación	486.96
Costo de ensamblaje	100.00
Imprevistos	442.04
Total	2652.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.7: Costos de componentes estandarizados

Componente	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
Batería Li-Po	1	36	36
Módulo de potencia + Switch	1	70	70
Servomotor	2	22	44
Motor DC	1	52	52
Controlador de vuelo	1	530	530
Controlador de velocidad (ESC)	1	30	30

Componente	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
Módulo de localización GPS	1	150	150
Módulo de telemetría wifi	1	30	30
Cámara	2	182	364
Paquete de espuma anti vibración	1	10	10
Espuma de polipropileno expandido 600 x 900 x 4 mm	2	14.5	29
Plancha de fibra de carbono 300 x 200 x 2 mm	1	66	66
Varilla de fibra de carbono Ø 2 x 500 mm	7	5	35
Engranaje piñón 11 T - 0.5 M	1	8	8
Engranaje recto 60 T - 0.5 M	1	24	24
Engranaje recto 12 T - 0.6 M	2	5	10
Engranaje recto 64 T - 0.6 M	2	11	22
Eje de acero Ø 5 x 40 mm	1	4.8	4.8
Eje de acero Ø 3 x 40 mm	1	3.5	3.5
Varilla conectora de tracción de servoenlace M3 A959-03	2	9	18
Rodamiento de brida MF73ZZ	10	0.9	9
Rodamiento de brida MF95ZZ	2	4	8
Arandela de retención M3, M5	4	0.6	2.4
Tornillo prisionero M1.4 x 2.5	4	1.8	7.2
Tornillo cabeza allen M2 x 10	4	0.15	0.6
Tornillo cabeza allen M2.5 x 8	4	0.2	0.8
Tornillo cabeza allen M2.5 x 16	4	0.25	1
Tornillo cabeza allen M2.5 x 20	2	0.3	0.6
Tornillo cabeza allen M2.5 x 25	2	0.35	0.7
Tornillo cabeza redonda M1.6 x 6	2	0.3	0.6
Tornillo cabeza redonda M1.6 x 8	2	0.35	0.7
Tornillo cabeza redonda M1.6 x 12	2	0.4	0.8
Tornillo cabeza redonda M3 x 25	2	0.5	1
Tuerca hexagonal M3, M2.5, M1.6	25	0.06	1.5
<b>Total</b>			<b>1571.20</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.8: Costos de componentes no estandarizados (impresión 3D)

Componente	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
Cabeza	1	6.00	6.00
Pico	1	2.00	2.00
Soporte servomotor	1	4.00	4.00
Junta de cola T	1	2.00	2.00
Junta de cola X	1	3.00	3.00
Junta de cola F	1	3.00	3.00
Junta de ala 1	2	2.00	4.00
Junta de ala 2	2	2.00	4.00
Junta de ala F	2	3.00	6.00
Junta de ala izquierda 1	1	2.00	2.00
Junta de ala izquierda 2	1	2.00	2.00
Junta de ala derecha 1	1	2.00	2.00
Junta de ala derecha 2	1	2.00	2.00
Articulación de ala 1	2	3.00	6.00
Articulación de ala 2	2	2.00	4.00
<b>Total</b>			<b>52.00</b>

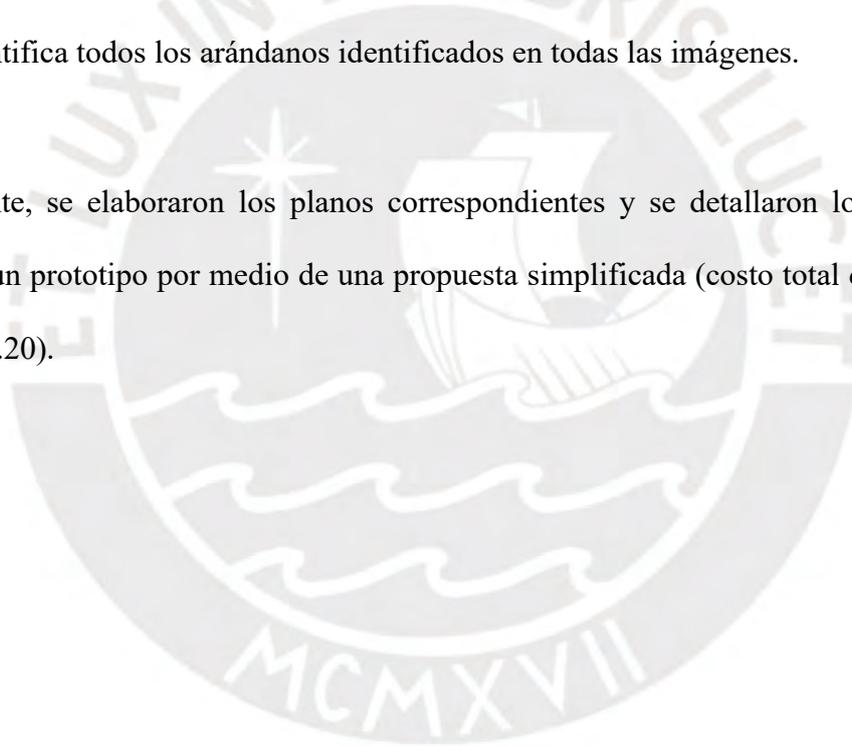
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, una vez que todos los componentes se encuentren disponibles, se estima que el ensamble del robot aéreo tardará aproximadamente 10 horas. Tomando en cuenta que un solo individuo es suficiente para la implementación de robot aéreo y un costo de S/. 10.00 por los servicios de ensamblaje del mismo, el costo total de esta tarea asciende a S/. 100.00. Además, se ha estimado que los costos de importación representan el 30% del costo total de los componentes estandarizados. Por último, se ha destinado un importe para imprevistos que asciende al 20% del importe total.

## CONCLUSIONES

- Se consiguió diseñar un sistema que permita navegar entre los surcos del campo de cultivo y realizar el registro visual de arándanos en los arbustos, siendo este el objetivo principal del presente trabajo. Este diseño óptimo hace el uso de tecnologías de desplazamiento aéreo de bajo costo, tamaño reducido y desempeño similar a las plataformas comerciales.
- Se han examinado los productos y las tecnologías más destacadas en el ámbito de sistemas de reconocimiento aplicados a campos de cultivo, especialmente para el producto de arándano.
- Los requerimientos específicos y funciones fueron propuestos, con lo cual se desarrolló el diseño siguiendo la metodología que permitió encontrar el diseño óptimo por medio de una evaluación técnico-económica.
- Posteriormente, se realizaron los cálculos correspondientes al dominio mecánico. A partir de estos cálculos, se seleccionaron componentes y dispositivos estandarizados y no estandarizados, que formarán al robot aéreo, cuya masa total asciende a 0.55 kg.
- Los componentes electrónicos/eléctricos seleccionados le darían la capacidad al robot de ubicarse en todo momento (GPS) y tener una autonomía de vuelo de 10 minutos, así como almacenar la información de registro visual (imágenes) y realizar el posterior procesamiento de las imágenes en una computadora.

- Se definieron las variables a ser controladas y manipuladas, lo que permite que el robot realice un vuelo estable alcanzando una velocidad de 6.9 m/s y mantener comunicación con una computadora mediante una interfaz (Mission Planner).
- En relación con el algoritmo de identificación, luego de un entrenamiento de 60 épocas se logró alcanzar una precisión media del 92%. En una primera etapa se utiliza el algoritmo Mask R-CNN para identificar el arándano en una imagen y luego en una segunda etapa el algoritmo K-means para identificar la madurez del mismo por medio del color dominante en la sección identificada. Asimismo, el desempeño general del algoritmo es del 93%, el cual cuantifica todos los arándanos identificados en todas las imágenes.
- Finalmente, se elaboraron los planos correspondientes y se detallaron los costos para fabricar un prototipo por medio de una propuesta simplificada (costo total de fabricación S/. 2,652.20).



## RECOMENDACIONES

- El desarrollo tecnológico que mejore la densidad energética de las baterías, al igual que la eficiencia de motores DC de pequeñas dimensiones será muy beneficioso para la performance del robot aéreo.
- El uso del polipropileno expandido como material para el fuselaje asegura un bajo peso dado los requerimientos de masa máxima y es un factor indispensable para asegurar la protección del sistema en general; sin embargo, es frágil frente a cargas de viento muy altas (superior a los 10 kilómetros por hora) y alturas superiores a los 5 metros de la superficie. Por lo tanto, se recomienda que el robot aéreo sea utilizado tomando en cuenta lo descrito anteriormente que corresponde a condiciones de las regiones de la costa del territorio peruano.
- Mayores variaciones en la imagen como en el caso de cambios en la luminosidad, posición o ángulo se pueden contemplar por medio del uso de técnicas de procesamiento de imágenes clásicas en la etapa de pre procesamiento. Asimismo, obtener un mayor conjunto de datos mejorará los resultados y permite que la rapidez de identificación del algoritmo sea mucho mayor.

## REFERENCIAS

- Abas M., Mohd A., Yusof H., Ahmad K. (2016). Flapping wing micro-aerial-vehicle: Kinematics, membranes, and flapping mechanisms of ornithopter and insect flight. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(5), 1159–1177.
- Benavides L. (2012). Estudio de Pre factibilidad para la producción y comercialización de arándanos en condiciones de valles andinos. *Lima: Sierra Exportadora*.
- CADDFPV. (s.f.). *Caddx Tarsier V2*. Recuperado el 06 de mayo de 2020, de <https://caddxfpv.com/collections/fpv-hd-equipment/products/caddx-tarsier>
- Clear Flight Solutions. (s.f.). *ROBIRD®*. Recuperado el 06 de mayo de 2020, de <https://www.robird.com/>
- Ministerio de Agricultura y Riego - Dirección General de Políticas Agrarias - Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria. (2016). *El arándano en el Perú y el mundo*. Lima.
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas-DGESEP-Dirección de Estadística Agraria-DEA. (2022). *El agro en cifras*. Lima.
- Gonzales S., Arellano C., Tapia J. (2019). Deepblueberry: Quantification of Blueberries in the Wild Using Instance Segmentation. *IEEE Access - Special section on new technologies for Smart Farming 4.0: Research challenges and opportunities*, 7, 105776–105788.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). (2017). *Manual de manejo agronómico del arándano*. Santiago.
- International Electrotechnical Commission. (1998). 60529 Degrees of Protection. Ginebra.
- He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. (2017). Mask R-CNN. *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 16, 2961–2969.

- Li H., Suk Lee W., Wang K. (2014). Identifying blueberry fruit of different growth stages using natural outdoor color images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 106, 91–101.
- Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo. (2008). Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico. Lima.
- Nielsen M. (2015). *Neural Networks and Deep Learning*. Washington, DC: Determination Press.
- SAGA Robotics. (s.f.). *Thorvald*. Recuperado el 06 de mayo de 2020, de <https://sagarobotics.com/pages/thorvald-platform>
- SENTERA. (s.f.). *DJI M200, M210 + AGX710 Gimbaled Ag Sensor (Drone + Sensor)*. Recuperado el 06 de mayo de 2019, de <https://sentera.com/product/dji-m200-agx710-upgrade/>
- Silin D. (2017). *Aerodynamics and Flight Performance of Flapping Wing Micro Air Vehicles* (Tesis post-doctoral). Universidad de Arizona, Arizona.
- Srigrarom S., Chan W. L. (2015). Ornithopter Type Flapping Wings for Autonomous Micro Air Vehicles. *J. Aerospace*, 2, 235–278.
- RunCAM. (s.f.). *RunCam Split 3 Micro*. Recuperado el 06 de mayo de 2020, de <https://shop.runcam.com/runcam-split-3-micro-and-split-3-nano/>
- Zhang E., Zhang Y. (2009). Average Precision. *Recall, precision and average precision* (pp. 192–193). Boston: Springer.

## ANEXO 1: Lista de requerimientos

## Lista de Requerimientos

Tabla A.1: Lista de Requerimientos. Fuente: Elaboración propia

LISTA DE REQUERIMIENTOS		
DISEÑO DE UN SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE MADUREZ DE ARÁNDANOS EN LOS ARBUSTOS UTILIZANDO APRENDIZAJE PROFUNDO		
CLIENTE:	Empresas del rubro agrícola especializado en arándanos	Elaborado por: Jason Valera
Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
E	<b>Función Principal:</b> Identificar el estado de madurez de arándanos en los arbustos.	Jason Valera
E	<b>Geometría:</b> Se debe tomar en cuenta que el sistema no debe ocupar un volumen mayor a 1500 x 1500 x 500 mm.	Jason Valera
E	<b>Cinemática:</b> La velocidad mínima de operación debe ser de 2 m/s (7.2 km/h), que corresponde para el recorrido de 1000 m.	Jason Valera
E	<b>Fuerzas:</b> El peso máximo será de 35 N, que es el peso promedio de los sistemas autónomos más ligeros en el mercado.	Jason Valera
E	<b>Energía:</b> Alimentación: debe contar con una fuente de energía recargable con una autonomía de 10 minutos, que es el tiempo promedio de los sistemas autónomos en el mercado. Además, su fuente de energía recargable (batería) se deberá recargar con un suministro eléctrico de 220 VAC y 60 Hz.	Jason Valera
E	<b>Electrónica:</b> Un sistema de control digital, para la ejecución de las acciones de actuadores y también para la lectura de las señales de entrada a ejecutar (sensores y datos de entrada).  Como mínimo un sensor que permitan la cumplir con la función de captura de imágenes y/o videos.	Jason Valera
E	<b>Control:</b> Variables que se controlarán en el sistema: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Control de velocidad</li> <li>● Control de posicionamiento</li> </ul>	Jason Valera

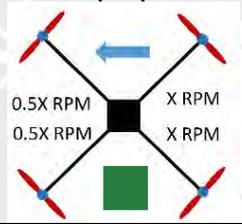
Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
E	<p><b>Señales:</b></p> <p>Entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Trayectoria de desplazamiento</li> <li>● Inicio/Parada de captura de imágenes</li> <li>● Encendido/Apagado</li> <li>● Inicio/Parada</li> <li>● Operación manual</li> <li>● Ambiente (campo de cultivo de arándanos)</li> </ul> <p>Salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Imágenes y/o videos procesadas</li> <li>● Velocidad de desplazamiento</li> <li>● Tiempo transcurrido desde el inicio</li> <li>● Energía restante</li> </ul>	Jason Valera
E	<p><b>Software:</b></p> <p>Programas que implementar para la identificación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Uso de un software de código abierto para el desarrollo del algoritmo de identificación del estado de madurez de los arándanos mediante la característica del color del mismo.</li> </ul>	Jason Valera
E	<p><b>Comunicación:</b></p> <p>La comunicación entre los actuadores, sensores y el controlador se dará de forma alámbrica.</p> <p>Las señales de entrada hacia el controlador y de ser necesario, la activación de la captura de imágenes y/o video se dará de forma inalámbrica. Asimismo, la información visual obtenida se traslada al software desarrollado en una PC mediante conexión alámbrica.</p>	Jason Valera
E	<p><b>Seguridad:</b></p> <p>Sistema:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Selección adecuada de los actuadores para evitar sobreesfuerzos.</li> </ul> <p>Operario:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Partes expuestas con bordes redondeados.</li> <li>● Se tendrá en cuenta la masa máxima (25 kg) que puede manipular una persona según la Norma Básica de Ergonomía RM 375.</li> </ul>	Jason Valera

Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
E	<p><b>Fabricación:</b></p> <p>Los materiales que se utilizarán para la construcción del sistema:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Estructura: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Material de construcción ligero, pero altamente resistente a esfuerzos y deformaciones.</li> </ul> </li> <li>● Electrónica: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Controladores con librería de código abierto.</li> </ul> </li> </ul> <p>Asimismo, el sistema debido al ambiente donde funcionará, este puede incluir factores ambientales desfavorables como polvo y humedad. Por lo tanto, se utilizará un Índice de Protección (IP-20).</p>	Jason Valera
E	<p><b>Montaje:</b></p> <p>Es una estructura fija con fácil acceso a los componentes de movimiento.</p>	Jason Valera
E	<p><b>Mantenimiento:</b></p> <p>El mantenimiento consistirá en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Limpieza del sistema de movimiento.</li> </ul>	Jason Valera
E	<p><b>Uso:</b></p> <p>Funcionamiento en general óptimo bajo condiciones ambientales de la costa (altura máxima 1000 m.s.n.m. con temperatura normal de 18°C a 25°C y humedad de 90%). La interacción entre el sistema y el usuario se da gracias a la interfaz.</p>	Jason Valera
E	<p><b>Costo:</b></p> <p>S/. 4000 como máximo.</p>	Jason Valera
E	<p><b>Plazo:</b></p> <p>Diseño Conceptual: 06 de julio de 2020</p> <p>Diseño Integrado: 06 de diciembre de 2020</p>	Jason Valera

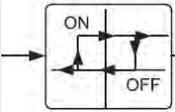
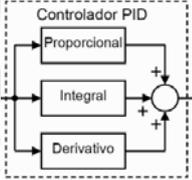
Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO 2: Matriz morfológica

Tabla A.2: Matriz Morfológica.

Dominio	Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Mecánico	Soportar / albergar componentes	Fuselaje tubular  ■ ■	Fuselaje planar  ■	
	Impulsar / detener movimiento	Propelas hélice (giro)  ■ ■	Alas (aleteo)  ■	
	Realizar movimiento	Configuración de rotores simétricos con propelas  ■	Configuración de alas + cola  ■	Configuración de ala volante  ■
Energía	Acondicionar energía eléctrica	Cargador de batería  ■ ■ ■		
	Almacenar energía	Batería LiPo  ■ ■	Batería NiMH  ■	
	Acondicionar energía para controladores, actuadores y sensores	Regulador de voltaje conmutado  ■ ■	Drivers  ■	

Dominio	Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Sensores	Sensar estado de la batería	Sensor de voltaje 	Sensor de corriente 	Sensor de voltaje y corriente 
	Sensar ubicación del sistema	Módulo GPS 		
	Sensar parámetros inerciales	Sistema de medición inercial en controlador de vuelo 	Unidad de medición inercial externa 	
Actuadores	Accionar mecanismo de movimiento	Motor paso a paso 	Servomotor 	Motor DC 
	Accionar mecanismo de impulso / detención de desplazamiento	Motor DC 	Motorreductor DC 	
Interacción con el usuario	Adquirir parámetros y/u operaciones iniciales	Interfaz en Laptop	Interfaz en Tablet	
	Recibir inicio/parada de captura de imágenes y/o videos			
	Visualizar estado del sistema			
	Mostrar estado de la batería			

Dominio	Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Control	Transmitir señales de entrada	Módulo 4G 	Módulo Wi-Fi 	Módulo RF 
	Controlar trayectoria y estados del sistema (hardware)	Controlador de vuelo + controlador de velocidad electrónico (ESC) 	Microcontrolador + controlador de velocidad electrónico (ESC) 	Computador de placa reducida + controlador de velocidad electrónico (ESC) 
	Controlar trayectoria y estados del sistema (software)	Control On/Off 	Control PID 	
Visión artificial	Registrar imágenes y/o videos	Cámaras para visión artificial 	Micro cámaras de alta resolución 	
	Almacenar información	Dispositivo de almacenamiento USB 	Tarjeta de almacenamiento SD 	Conexión en la nube 

Fuente: Elaboración Propia

Tabla A.3: Leyenda de indicadores para matriz morfológica

Indicador	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Cuadrilátero			

Fuente: Elaboración Propia

### ANEXO 3: Simulaciones

El robot aéreo se desplaza sobre un fluido, en este caso aire, que ofrece resistencia al vuelo. Para calcular la fuerza del viento sobre el sistema, se tienen 2 casos: cuando el viento está a favor del robot aéreo y, el más crítico, cuando el viento está en contra del vuelo del robot aéreo, que será el momento en donde el sistema tenga que generar mayor fuerza.

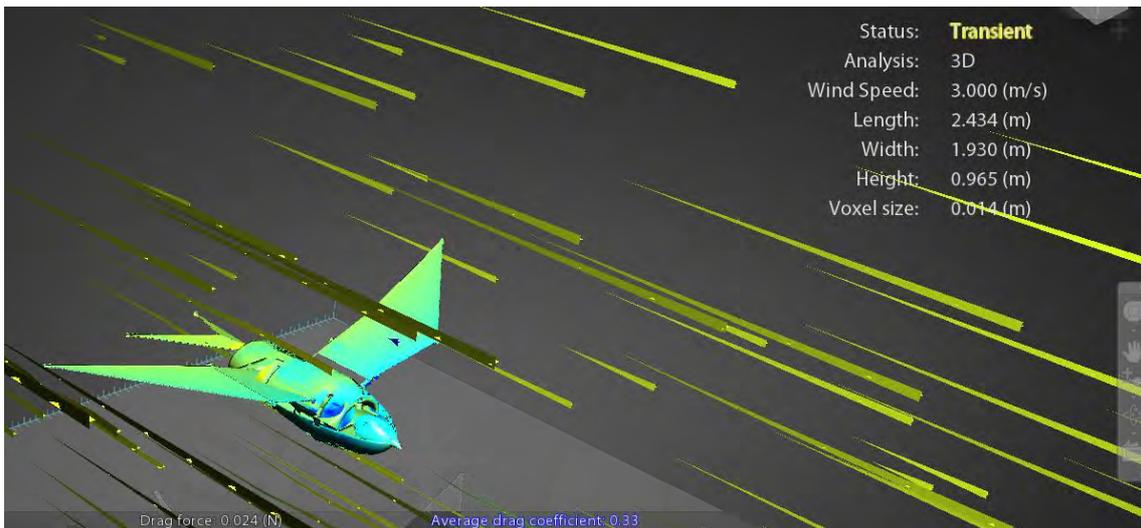


Figura A1: Simulación de robot aéreo volando con viento a favor (Fuente: Elaboración propia)

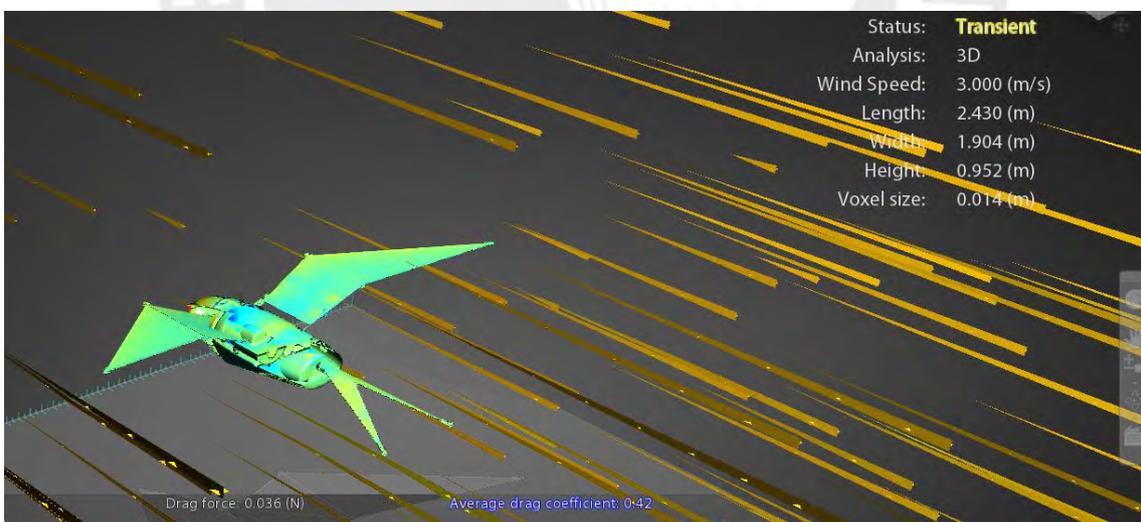


Figura A2: Simulación de robot aéreo volando con viento en contra (Fuente: Elaboración propia)

Con la ayuda del software Flow Design se simuló la fuerza de arrastre que ejerce el viento sobre el sistema. De las Figuras A1 y A2 se observa que para el primer caso la fuerza de arrastre es de aproximadamente 0.024N y para el segundo caso es de 0.036N.

Asimismo, se realizó una simulación para mostrar los puntos sobre los que el aire ejerce mayor presión cuando el robot aéreo está en movimiento con viento en contra, con ello analizar si el sistema puede fallar en alguno de estos puntos.

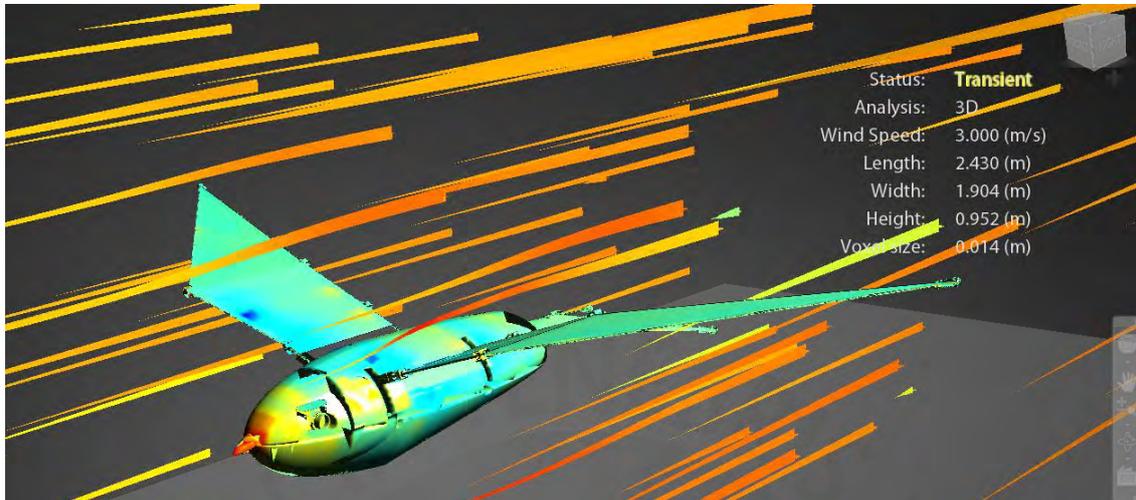


Figura A3: Simulación de robot aéreo para mostrar presión del aire (Fuente: Elaboración propia)

Como se observa en la Figura A3 el fuselaje de la cabeza recibe la mayor cantidad de presión del aire. Se procedió a realizar la simulación de este componente y hallar la fuerza de arrastre que ejerce el viento sobre este.

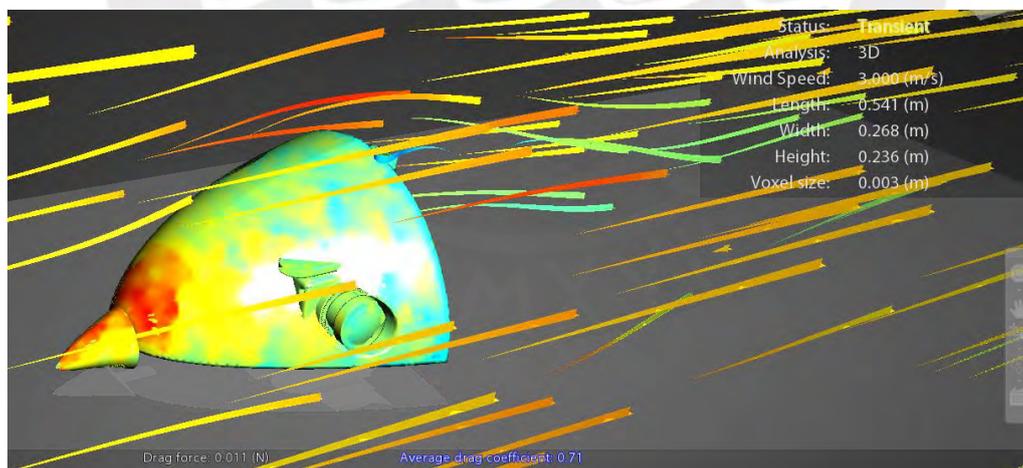


Figura A4: Simulación del elemento del robot aéreo con mayor presión (Fuente: Elaboración propia)

A partir de esta simulación se observó que la fuerza de arrastre sobre este elemento es de aproximadamente 0.011N por lo que se descartó alguna falla.

#### ANEXO 4: Imágenes de identificación de arándanos

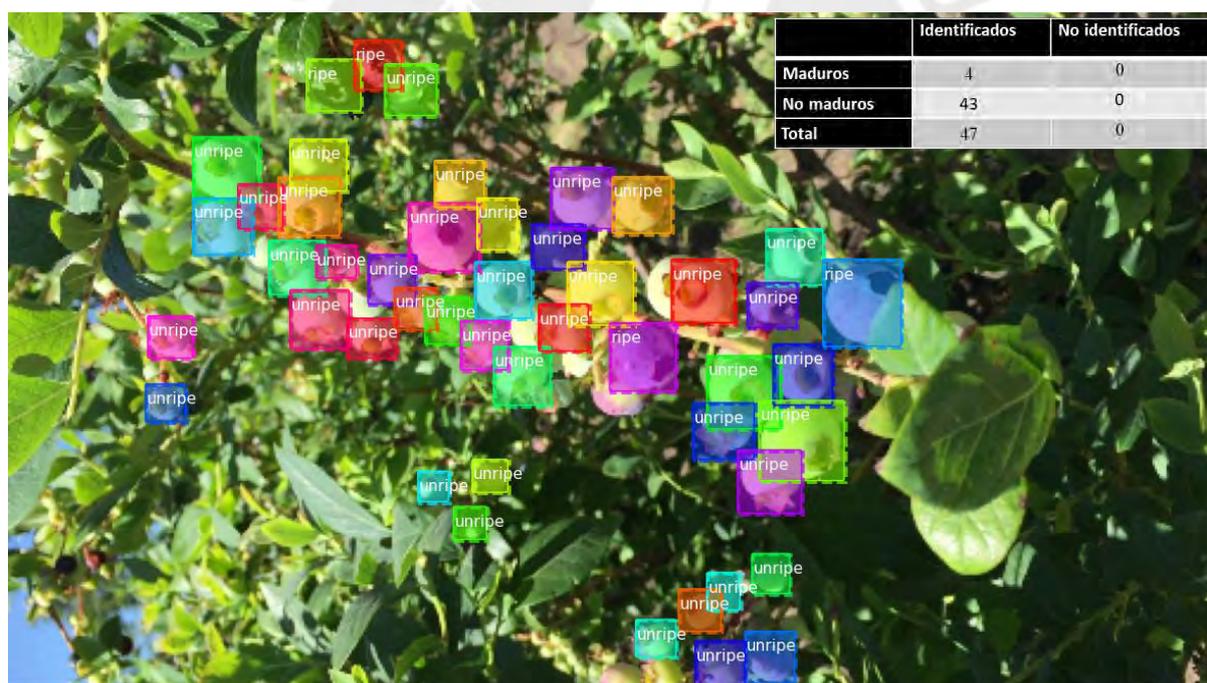


Figura A5: Imagen prototipo obtenida por el robot aéreo (arriba) e imagen procesada (abajo), en la cual algunos arándanos identificados son erróneamente clasificados, se clasifica arándanos no maduros como maduros.

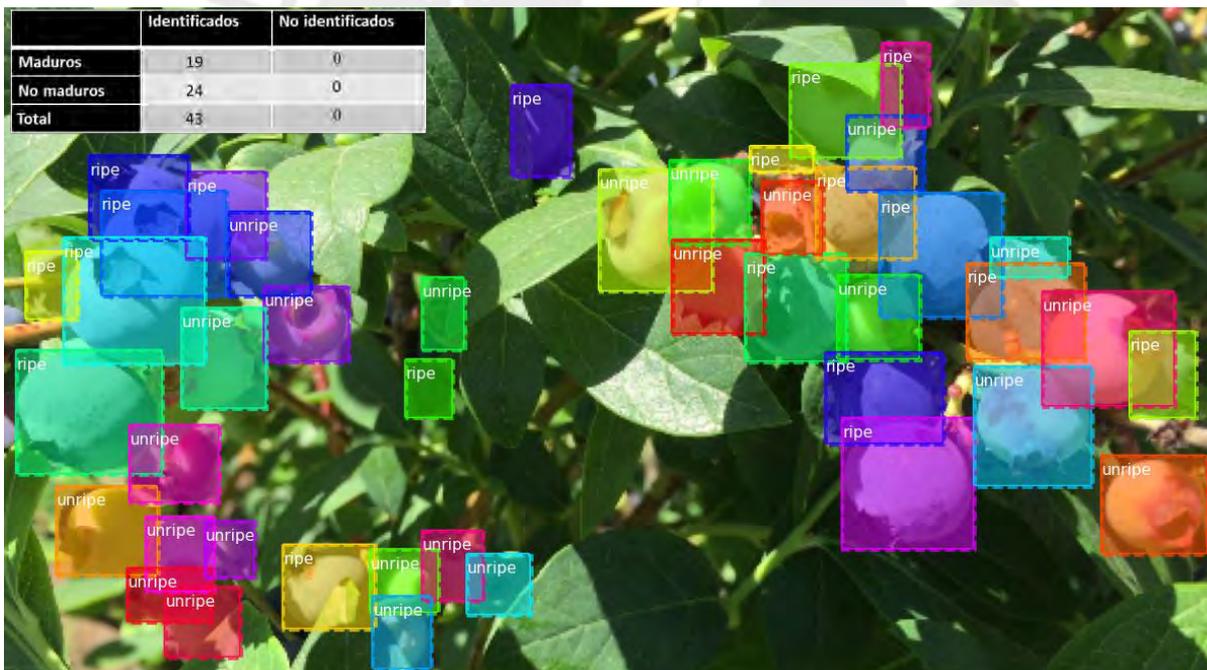


Figura A6: Imagen prototipo obtenida por el robot aéreo (arriba) e imagen procesada (abajo), en la cual los arándanos identificados son correctamente clasificados.

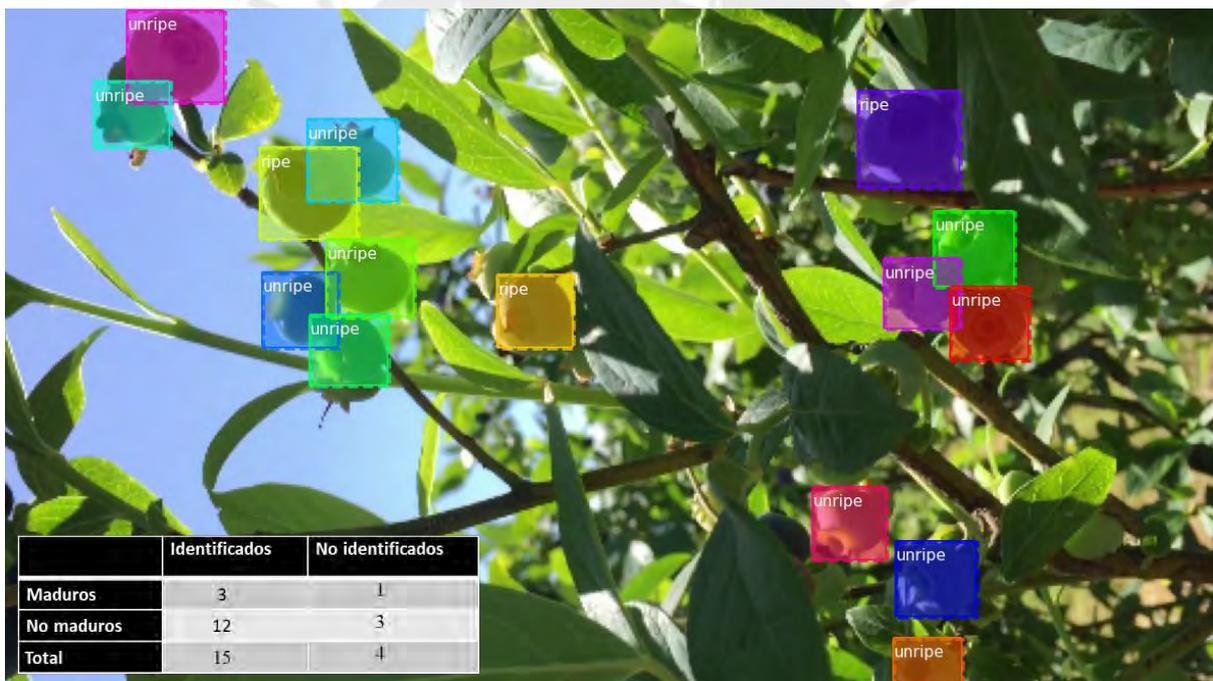


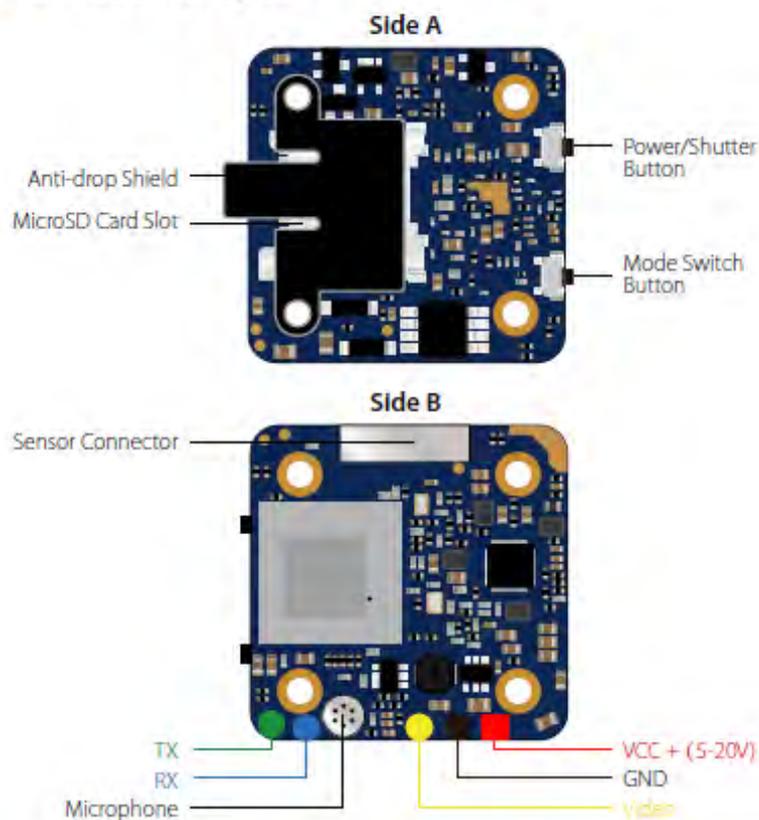
Figura A7: Imagen prototipo obtenida por el robot aéreo (arriba) e imagen procesada (abajo), en la cual los arándanos identificados son correctamente clasificados; sin embargo existen arándanos que no han sido identificados, debido a la interferencia con otros elementos en la imagen, hojas o ramas.

## ANEXO 5: Hojas de datos

### 1. Cámara



#### ■ Instruction Diagram



#### ■ Lens Module Connection Diagram



## ■ Micro SD Card

Capacity up to 64GB; Please use high speed cards(Class10/UHS-I/UHS-II)

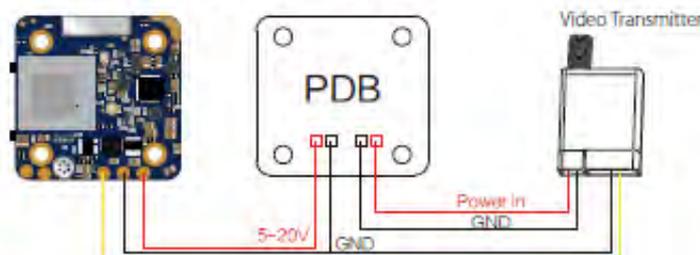


Please push the shield a little bit up with one hand like showed in above step 1 and then press the SD card(step 2) with another hand to let the card pop out.

## ■ Basic Camera Operation

<b>Powering On/Off</b>	Long press the Power/Shutter button
<b>Standby Mode</b>	Camera Status Light: Blue is On
<b>Mode Switching</b>	In Standby Mode, long press the Mode Switch button to cycle through the two modes: Video/OSD settings.
<b>Video Mode</b>	Camera Status Light: Blue blinks Press the Power/Shutter button to start/stop recording.
<b>OSD Setup Mode</b>	Camera Status Light: Orange is On <ul style="list-style-type: none"> <li>• Press the Power/Shutter button to move to a setting.</li> <li>• Short press the Mode Switch button to change setting.</li> <li>• Long press the Mode Switch button to exit the menu.</li> </ul>
<b>Firmware Upgrading</b>	Camera Status Light: Orange blinks <a href="https://www.runcam.com/download/runcamsplit3series">https://www.runcam.com/download/runcamsplit3series</a>
<b>Reset</b>	In standby mode, press the Mode Switch button three times in rapid succession (within 2 seconds). When resetting is complete, the status light (orange) blinks twice, and the

## ■ Transmitter Connection Diagram



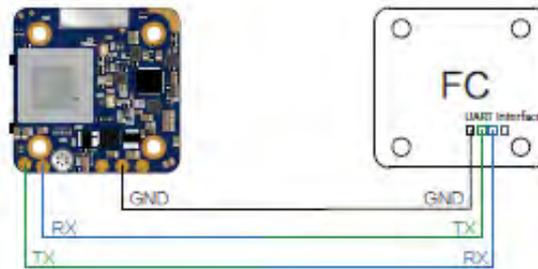
**Warning:** Current Input  $\geq 1\text{A}$  (Don't powered by VTx)

## ■ Flight Controller Set

### Preparation

- Firmware: BetaFlight Firmware ( $\geq 3.2.0$ ), CleanFlight Firmware ( $\geq 2.1.0$ ), KISS Firmware ( $\geq 1.3\text{-RC30}$ ) or INAV Firmware ( $\geq 1.7.3$ ).
- Any available UART interface on the Flight Controller

**1. Connect the Split 3 series with the UART interface of the Flight Controller**



## 2. Make the Flight Controller recognize the Split 3 series

For example, we connect the Split 3 series to the UART 3 interface on the Flight Controller: connect the Flight Controller to the computer, then open the configurator software of the Flight Controller. (Open up the configurator that matches the firmware you are running, Betaflight Configurator for Betaflight, Cleanflight Configurator for Cleanflight). In the Peripherals column of the line UART3 (on the Ports tab), select RunCam Device and click Save And Reboot.



## 3. Instructions of the functions of the camera and assigning transmitter channels to them

In the Flight Controller Configurator, navigate to the Modes tab. There are new CAMERA WI-FI, CAMERA POWER and CAMERA CHANGE modes

- CAMERA POWER: start/stop the video. When in the OSD of the camera, this is used to move to the next menu item.
- CAMERA CHANGE MODE: switch among the two modes: video and OSD setting mode. When in the OSD of the camera, this will exit the menu

Assign any available channel to the function you need, for example:

- Assign the AUX2 to the CAMERA POWER, range 1900-2100
- Assign the AUX3 to the CAMERA CHANGE MODE, range 1900-2100



#### 4. Assign the channel to the switch of the controller

Please choose your Model on the controller, then access to the MIXER interface and assign the channel to the switch of the controller. Take opentx 2.2.0 for example, assign the channels CH5, CH6 and CH7 to SA, SB and SD respectively



#### 5. Test

Power the Flight Controller and the Split 3 series

- Set the SA to the bottom, the camera starts/stops the video
- Set the SD to the bottom, the camera switches among the two modes: video and OSD setting mode

### ■ Technical Support

Please visit: <https://support.runcam.com>

### ■ Parameter

Model	Split 3 Micro	Split 3 Nano
Field of View(FOV)	Recording FOV 165°(FPV FOV: 165° @16:9, 130° @4:3)	
Video Resolution	1080@60fps/1080@50fps/1080@30fps/720@60fps	
Video File Format	MOV	
Image Resolution	2 MP	
TV Mode	NTSC (720*480)/PAL (720*576) Switchable	
Interface	JST 1.25mm / UART	
Max Micro SD Card Supported	64G(need Class 6 or above, recommend Class 10/UHS-I/UHS-II/UHS-III)	
Mounting Hole Distance	20*20mm	
PCB Size	29*29mm	
Lens Module Size	19*19mm	14*14mm
Lens Specs	M12	M8
Power Input	DC 5-20V (Non-direct power supply from battery. Powered directly with battery will generate surges and burn the camera.)	
Working Current	650mA @5V/270mA @1.2V	
Weight	14g	10.5g

## 2. Módulo de potencia

SPECIFICATION	CODE		DATA	2014.04.03
1. DESCRIPTION : APM Power Module with XT60 Connectors				
2. MODEL : HPM-02				
<p>The APM 2.5 Power Module is a simple way of providing your APM and Pixhawk with clean power from a LiPo battery as well as current consumption and battery voltage measurements, all through a 6-pos cable. The on-board switching regulator outputs 5.3V and a maximum of 2.5A from up to a 10S LiPo battery. The Power Module comes completely assembled with XT60 connectors, and wrapped in shrink tubing for protection.</p> <p>Note: The Power Module is only designed to power APM, Pixhawk, a RC receiver and APM accessories (GPS, radio). It is <b>not</b> designed to power servos. Use your aircraft's own ESC/BEC for that.</p> <p><b>Specifications:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Max input voltage: 42V</li> <li>Max current sensing: 90A</li> <li>Voltage and current measurement configured for 5V ADC</li> <li>Switching regulator outputs 5.3V and 2.5A max</li> <li>6-pos Molex cable plugs directly to APM/Pixhawk's 'PM' connector</li> </ul> <p><b>Package Include :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Molex 6 Position Connector 15 cm</li> <li>APM Power Module with XT60 Connectors Board</li> </ul> <p><b>Image:</b></p>				



**Holybro** Hobby

### 3. Controlador de velocidad (ESC)

## User Manual of Brushless Speed Controller

Thanks for purchasing our Electronic Speed Controller (ESC). High power system for RC model is very dangerous, please read this manual carefully. In that we have no control over the correct use, installation, application, or maintenance of our products, no liability shall be assumed nor accepted for any damages, losses or costs resulting from the use of the product. Any claims arising from the operating, failure or malfunctioning etc. will be denied. We assume no liability for personal injury, property damage or consequential damages resulting from our product or our workmanship. As far as is legally permitted, the obligation to compensation is limited to the invoice amount of the affected product.

### Specifications

Model	Cont. Current	Burst Current (±10s)	BEC Mode	BEC Output	BEC Output Capability				Battery Cell		Weight	Size L*W*H
					2S Lipo	3S Lipo	4S Lipo	6S Lipo	Lipo	NIMH		
Skywalker-6A	6A	8A	Linear	5V0.8A	3 servos				2S	5-6 cells	5.5g	32*12*4.5
Skywalker-12A	12A	15A	Linear	5V1A	3 servos	2 servos			2-3S	5-9 cells	9g	38*18*6
Skywalker-12AE	12A	15A	Linear	5V2A	5 servos	4 servos			2-3S	5-9 cells	10g	38*18*7
Skywalker-15A	15A	20A	Linear	5V2A	5 servos	4 servos			2-3S	5-9 cells	16.5g	48*22.5*6
Skywalker-20A	20A	25A	Linear	5V2A	5 servos	4 servos			2-3S	5-9 cells	19g	42*25*8
Skywalker-30A	30A	40A	Linear	5V2A	5 servos	4 servos			2-3S	5-9 cells	37g	68*25*8
Skywalker-40A	40A	55A	Linear	5V3A	5 servos	4 servos			2-3S	5-9 cells	39g	68*25*8
Skywalker-40A-UBEC	40A	55A	Switch	5V3A	5 servos	5 servos	5 servos		2-4S	5-12 cells	43g	65*25*12
Skywalker-50A-UBEC	50A	65A	Switch	5V5A	8 servos	8 servos	6 servos	6 servos	2-4S	5-12 cells	41g	65*29*10
Skywalker-60A-UBEC	60A	80A	Switch	5V5A	8 servos	8 servos	6 servos	6 servos	2-6S	5-18 cells	63g	77*35*14
Skywalker-60A-OPTO	60A	80A	N/A	N/A					2-6S	5-18 cells	60g	86*38*12
Skywalker-80A-UBEC	80A	100A	Switch	5V5A	8 servos	8 servos	6 servos	6 servos	2-6S	5-18 cells	82g	86*38*12
Skywalker-80A-OPTO	80A	100A	N/A	N/A					2-6S	5-18 cells	79g	86*38*12

### Programmable Items (The option written in bold font is the default setting)

- Brake Setting: Enabled / Disabled
- Battery Type: **Lipo** / NiMH
- Low Voltage Protection Mode(Cut-Off Mode): **Soft Cut-Off** (Gradually reduce the output power) /Cut-Off (Immediately stop the output power)
- Low Voltage Protection Threshold(Cut-Off Threshold): **Low** / Medium / High
  - For lithium battery, the battery cell number is calculated automatically. Low / medium / high cutoff voltage for each cell is: 2.85V/3.15V/3.3V. For example: For a 3S Lipo, when "Medium" cutoff threshold is set, the cut-off voltage will be: 3.15\*3=9.45V
  - For NiMH battery, low / medium / high cutoff voltages are 0%/50%/65% of the startup voltage (i.e. the initial voltage of battery pack), and 0% means the low voltage cut-off function is disabled. For example: For a 6 cells NiMH battery, fully charged voltage is 1.44\*6=8.64V, when "Medium" cut-off threshold is set, the cut-off voltage will be: 8.64\*50%=4.32V.
- Startup Mode: **Normal** /Soft /Super-Soft (300ms / 1.5s / 3s)
  - Normal mode is suitable for fixed-wing aircraft. Soft or Super-soft modes are suitable for helicopters. The initial acceleration of the Soft and Super-Soft modes are slower, it takes 1.5 second for Soft startup or 3 seconds for Super-Soft startup from initial throttle advance to full throttle. If the throttle is completely closed (throttle stick moved to bottom position) and opened again (throttle stick moved to top position) within 3 seconds after the first startup, the re-startup will be temporarily changed to normal mode to get rid of the chance of a crash caused by slow throttle response. This special design is suitable for aerobatic flight when quick throttle response is needed.
- Timing: **Low** / Medium / High, (3.75° /15° /26.25° )  
Usually, low timing is suitable for most motors. To get higher speed, High timing value can be chosen.

### Begin To Use Your New ESC

**IMPORTANT!** Because different transmitter has different throttle range, please calibrate throttle range before flying.

**Throttle range setting (Throttle range should be reset whenever a new transmitter is being used)**

Switch on the transmitter, move throttle stick to the top position	Connect battery pack to the ESC, and wait for about 2 seconds	The "Beep-Beep-" tone should be emitted, means the top point of throttle range has been confirmed	Move throttle stick to the bottom position, several "beep-" tones should be emitted to present the amount of battery cells	A long "Beep-" tone should be emitted, means the lowest point of throttle range has been correctly confirmed
--	---	---	--	--

### Normal startup procedure

Move throttle stick to bottom position and then switch on transmitter.	Connect battery pack to ESC, special tone like "♪ 123" means power supply is OK	Several "beep-" tones should be emitted to present the amount of lithium battery cells	When self-test is finished, a long "beep-----" tone should be emitted	Move throttle stick upwards to go flying
--	---	--	---	--

### Protection Function

- Start up failure protection: If the motor fails to start within 2 seconds of throttle application, the ESC will cut-off the output power. In this case, the throttle stick **MUST** be moved to the bottom again to restart the motor. (Such a situation happens in the following cases: The connection between ESC and motor is not reliable, the propeller or the motor is blocked, the gearbox is damaged, etc.)
- Over-heat protection: When the temperature of the ESC is over about 110 Celsius degrees, the ESC will reduce the output power.

3. Throttle signal loss protection: The ESC will reduce the output power if throttle signal is lost for 1 second, further loss for 2 seconds will cause the output to be cut-off completely.

**Trouble Shooting**

Trouble	Possible Reason	Action
After power on, motor does not work, no sound is emitted	The connection between battery pack and ESC is not correct	Check the power connection. Replace the connector.
After power on, motor does not work, such an alert tone is emitted: "beep-beep-, beep-beep-,beep-beep-" (Every "beep-beep-" has a time interval of about 1 second)	Input voltage is abnormal, too high or too low.	Check the voltage of battery pack
After power on, motor does not work, such an alert tone is emitted: "beep-, beep-, beep-" (Every "beep-" has a time interval of about 2 seconds)	Throttle signal is irregular	Check the receiver and transmitter Check the cable of throttle channel
After power on, motor does not work, such an alert tone is emitted: "beep-, beep-, beep-" (Every "beep-" has a time interval of about 0.25 second)	The throttle stick is not in the bottom (lowest) position	Move the throttle stick to bottom position
After power on, motor does not work, a special tone "♪ 50712" is emitted after 2 beep tone (beep-beep-)	Direction of the throttle channel is reversed, so the ESC has entered the program mode	Set the direction of throttle channel correctly
The motor runs in the opposite direction	The connection between ESC and the motor need to be changed.	Swap any two wire connections between ESC and motor

**Program the ESC with your transmitter (4 Steps)**

**Note:** Please make sure the throttle curve is set to 0 when the throttle stick is at bottom position and 100% for the top position.

1. Enter program mode
2. Select programmable items
3. Set item's value (Programmable value)
4. Exit program mode

**2. Select programmable items**

After entering program mode, you will hear 8 tones in a loop with the following sequence. If you move the throttle stick to bottom within 3 seconds after one kind of tones, this item will be selected.

- |                          |                    |                  |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| 1. "beep"                | brake              | (1 short tone)   |
| 2. "beep-beep"           | battery type       | (2 short tone)   |
| 3. "beep-beep-beep"      | cutoff mode        | (3 short tone)   |
| 4. "beep-beep-beep-beep" | cutoff threshold   | (4 short tone)   |
| 5. "beep-----"           | startup mode       | (1 long tone)    |
| 6. "beep-----beep"       | timing             | (1 long 1 short) |
| 7. "beep-----beep-beep"  | set all to default | (1 long 2 short) |
| 8. "beep-----beep-----"  | exit               | (2 long tone)    |

**Note:** 1 long "beep-----" = 5 short "beep"

**1. Enter program mode**

- 1) Switch on transmitter, move throttle stick to top position, connect the battery pack to ESC
- 2) Wait for 2 seconds, the motor should emit special tone like "beep-beep"
- 3) Wait for another 5 seconds, special tone like "♪ 50712" should be emitted, which means program mode is entered



**3. Set item value (Programmable value)**

You will hear several tones in loop. Set the value matching to a tone by moving throttle stick to top when you hear the tone, then a special tone "♪ 1515" emits, means the value is set and saved. (Keeping the throttle stick at top, you will go back to Step 2 and you can select other items; or moving the stick to bottom within 2 seconds will exit program mode directly)

Items	Tones		
	"beep-" 1 short tone	"beep-beep-" 2 short tones	"beep-beep-beep" 3 short tones
Brake	Off	On	
Battery type	Lipo	NiMH	
Cutoff mode	Soft-Cut	Cut-Off	
Cutoff threshold	Low	Medium	High
Start mode	Normal	Soft	Super soft
Timing	Low	Medium	High



**4. Exit program mode**

There are 2 ways to exit program mode:

1. In step 3, after special tone "♪ 1515", please move throttle stick to the bottom position within 2 seconds.
2. In step 2, after tone "beep-----beep-----" (that is: The item #8), move throttle stick to bottom within 3 seconds.

## 4. Módulo de localización GPS



# NEO-M8P

u-blox M8 high precision GNSS modules

Data sheet



### Abstract

The NEO-M8P module provides centimeter-level GNSS positioning for the mass market with integrated real time kinematics (RTK) for fast time-to-market. This small, light, and energy-efficient RTK module is a complete and versatile solution thanks to its base and rover variants and moving baseline technology for attitude sensing and follow-me applications.

[www.u-blox.com](http://www.u-blox.com)

UBX-15016656 - R08





-  Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) satellites are tracked and included in raw data output but are not used in navigation or real time kinematics (RTK).

### 1.3 Performance

Parameter	Specification			
Receiver type	72-channel u-blox M8 engine GPS L1C/A, GLONASS L1OF, BeiDou B1I			
Accuracy of timepulse signal	RMS	30 ns		
	99%	60 ns		
Frequency of timepulse signal	0.25 Hz...10 MHz (configurable)			
Operational limits <sup>1</sup>	Dynamics	≤ 4 g		
	Altitude	50,000 m		
	Velocity	500 m/s		
Velocity accuracy	0.05 m/s			
Dynamic heading accuracy	0.3° <sup>2,3</sup>			
		GPS & GLONASS	GPS & BeiDou	GPS
Time-To-First-Fix <sup>3</sup>	Cold start	26 s	28 s	29 s
	Hot start	1 s	1 s	1 s
	Aided starts <sup>4</sup>	2 s	3 s	2 s
Sensitivity <sup>5</sup>	Tracking & Navigation <sup>6</sup>	-160 dBm	-160 dBm	-160 dBm
	Reacquisition	-160 dBm	-160 dBm	-160 dBm
	Cold start	-148 dBm	-148 dBm	-148 dBm
	Hot start	-157 dBm	-157 dBm	-157 dBm
Max navigation update rate	RTK	5 Hz	5 Hz	8 Hz
	Moving Baseline RTK	4 Hz	4 Hz	4 Hz
	PVT	5 Hz	5 Hz	10 Hz
	RAW	10 Hz	10 Hz	10 Hz
Convergence time <sup>7</sup>	RTK	<60 s <sup>8</sup>	<60 s <sup>8</sup>	3.5 min <sup>9</sup>
Horizontal position accuracy	Standalone <sup>9</sup>	2.5 m CEP		
	RTK <sup>8, 10</sup>	0.025 m + 1 ppm CEP		

Table 1: NEO-M8P performance in different GNSS modes (default: concurrent reception of GPS and GLONASS)

<sup>1</sup> Assuming Airborne < 4 g platform

<sup>2</sup> 50% at 30 m/s for dynamic operation or assuming a 1 m baseline in MB mode

<sup>3</sup> All satellites at -130 dBm

<sup>4</sup> Dependent on aiding data connection speed and latency

<sup>5</sup> Demonstrated with a good external LNA

<sup>6</sup> Limited by FW for best performance

<sup>7</sup> Depends on atmospheric conditions, baseline length, GNSS antenna, multipath conditions, satellite visibility and geometry

<sup>8</sup> Measured with 1 km baseline, patch antennas with ground planes; GPS + BeiDou measured in Singapore

<sup>9</sup> CEP, 50%, 24 hours static, -130 dBm, > 6 SVs

<sup>10</sup> ppm limited to baselines up to 10 km

## 5 Mechanical specifications

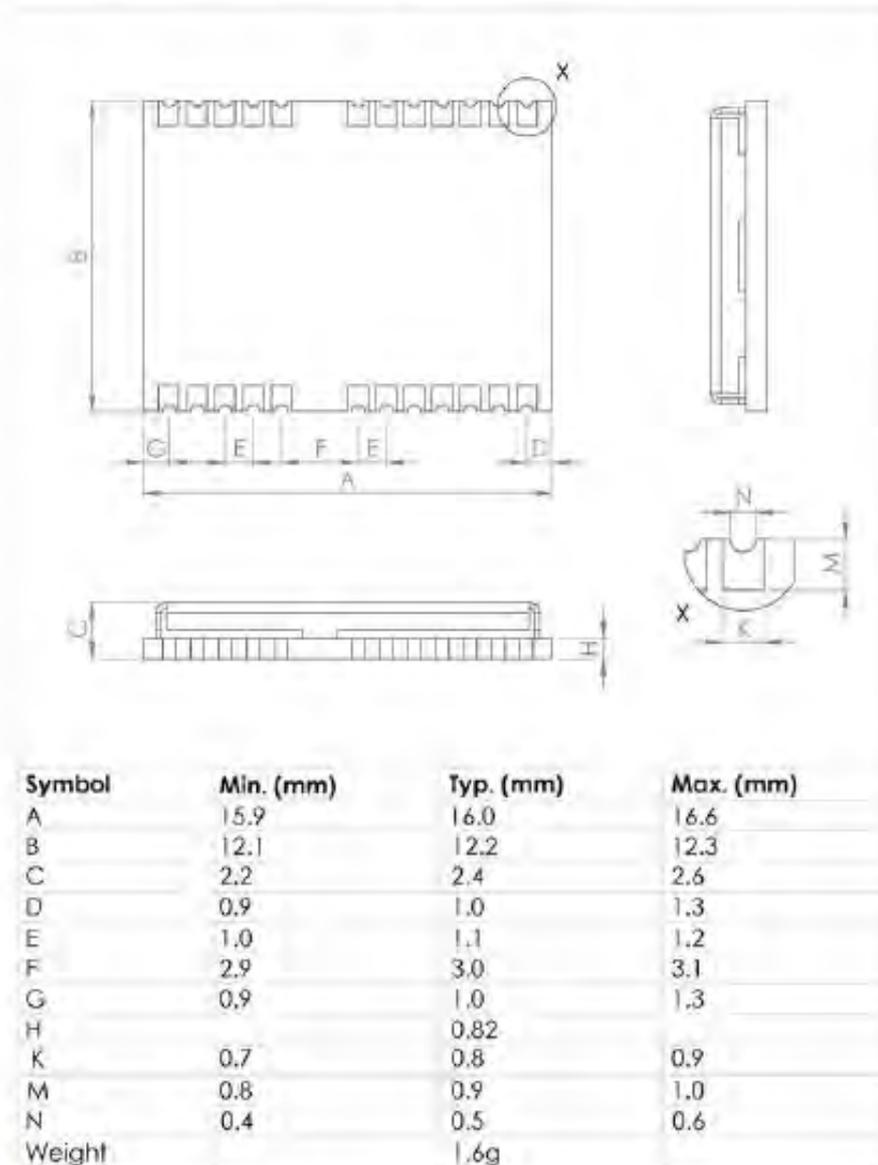


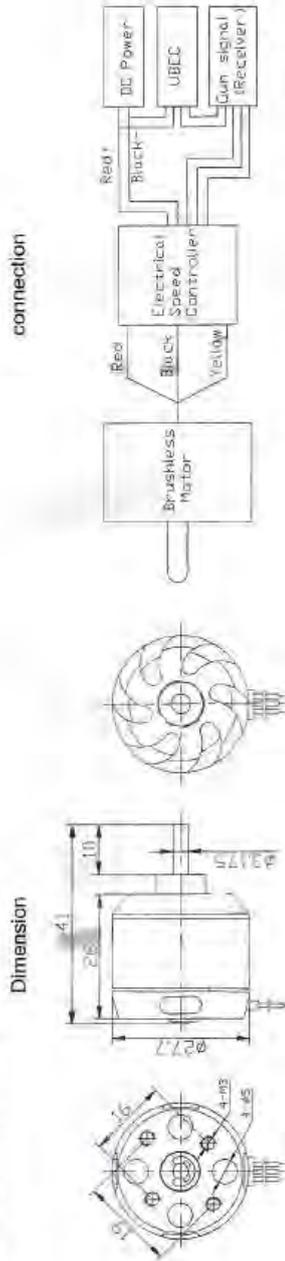
Figure 7: Dimensions



For information about the paste mask and footprint, see the NEO-M8P Hardware integration manual [1].

## 5. Motor DC

### D2826 Out Runner Brushless Motor Instruction



Congratulation for your purchase of high performance brushless outrunner motor series.

Our motors are designed to use perfectly with our own electronic speed controllers. But it is also possible to use them with most of other common electronic speed controllers. The motors are designed for running clockwise or counterclockwise. To change the turning direction you just simply exchange the red and yellow connection wire. If you want to use other speed controllers, please refer to your controller instruction manual.

#### D2826 (2212) SERIES OUTRUNNER BRUSHLESS MOTOR

Model	Volts	KV (rpm/v)	Max pull	Weight	Motor size	Shaft size	Max power	ESC(A)	Battery/prop
D2826-6	7.4-11.1V	2200	960g	50g	ø27.7*26mm	ø3.175x41mm	342watt	40A	LiPoX2/7x3
D2826-10		1400	780g				205watt		LiPoX3/5x5
D2826-13		1000	660g				150watt		LiPoX2/9x4.7
D2826-15		930	645g				130watt		LiPoX3/7x4
									LiPoX2/11x7
									LiPoX3/10x5
									LiPoX2/12x6
									LiPoX3/11x7

#### Product description

1. Mount your motor with the includes screws tightly on your front cover of model.
2. Our motors provide high efficiency stator design.
3. Small size, lightweight and long life.

#### ATTENTION:

1. Please make sure your motor has enough cooling while running. Consider to put a whole into your model motor cover to improve the ventilation.
2. Our motors providing best performance with the recommended propeller size. If you consider to change the propeller size be aware that motor can overheat and damaged.
3. Keep motors away from moisture, dust, scrap and small items to avoid damages.  
We wish you many happy landings with our long life quality equipment.

## 6. Servomotor

### BLUEARROW D05010MG

#### Digital Precision Sub-Micro Servo

##### Product Description:

- This is ultra small, high-precision small metal gear digital servo drive.
- Hard aluminum gear, light weight, high strength, smooth operation, low noise.
- Metal gear compact structure, the combination of a POM gear transition, with a suitable rotation torque and durability.
- Department of the output shaft with a metal bearings, ensure the strength, precision and smoothness are very satisfactory.
- D05010MG gear structure for the special requirements of the ultra-compact servo-control system.

##### Specifications:

Control System:	PWM Pulse Width Control
Processor:	Digital IC
Required Pulse:	3 to 5 V Peak to Peak Square Wave
Working frequency:	1500 $\mu$ s / 333 $\mu$ s
Rotation angle sensor:	Precision Potentiometer
Rotation:	Left Rotation: 45°, Right Rotation: 45°
Voltage:	4.8V to 6.0V
Temperature Range:	-20°C to 60°C
Driver Type:	MOSFET
Operating Angle:	45 Deg. one side pulse traveling 400 $\mu$ s
Direction:	Clockwise/Pulse Traveling 900 $\mu$ s-2100 $\mu$ s
Pulse Width Scope:	900-2100 $\mu$ s
Neutral pulse:	1500 $\mu$ s
Speed:(No-load ):	0.08sec/ 60° @ 4.8V 0.07sec/ 60° @ 6.0V
Torque:(Stall Full load):	1.20 kg . cm @ 4.8V 1.50 kg . cm @ 6.0V
Idle Current:	0.05 A/ 4.8V 0.05 A/ 6.0V
Running Current:	0.09 A/ 4.8V 0.09 A/ 6.0V
Stall Current:	0.09 A/ 4.8V 0.09 A/ 6.0V
Motor Type:	Coreless Motor
Bearings:	1 Ball Bearing
Bearing Type:	MR74 (4mmX7mmX2mm)
Gear Material:	Aviation duralumin alloy+POM
Servo case:	ABS
Plug:	"J" type
Connector Wire Length:	160.00 mm
Connector Wire SPEC:	OD0.8mm/16 x 0.08mm 3p x 160mm "J" type
Weight:	5.80 g
Dimensions (L x W x H):	19.60*8.00*19.40 mm

## 7. Controlador de vuelo

# pixhawk<sup>®</sup> 4 mini

The power of Pixhawk<sup>®</sup> 4 in a compact form

### Product Features

- Half the footprint of the *Pixhawk<sup>®</sup> 4*
- The same FMU processor and memory resources as the *Pixhawk 4*
- Aluminum casing for great thermal performance
- Easy to connect to commercial ESCs
- The latest sensor technology from Bosch<sup>®</sup> and InvenSense<sup>®</sup>
- Redundant IMUs for reliable performance
- NuttX real-time operating system
- Pre-installed with the most recent PX4 firmware



The *Pixhawk<sup>®</sup> 4 Mini* autopilot is designed for engineers and hobbyists who are looking to tap into the power of *Pixhawk 4* but are working with smaller drones. *Pixhawk 4 Mini* takes the FMU processor and memory resources from the *Pixhawk 4* while eliminating normally unused interfaces. This allows the *Pixhawk 4 Mini* to be small enough to fit in a 250mm racer drone. The *Pixhawk 4 Mini* is easy to install; the 2.54mm (0.1in) pitch connector makes it easier to connect the 8 PWM outputs to commercially available ESCs.

*Pixhawk 4 Mini* was designed and developed in collaboration with Holybro<sup>®</sup> and Aulerion<sup>®</sup>. It is based on the Pixhawk FMUv5 design standard and is optimized to run PX4 flight control software.

# pixhawk<sup>®</sup> 4 mini

## Technical Specifications

- FMU Processor: STM32F765
  - 32 Bit Arm® Cortex®-M7, 216MHz, 2MB memory, 512KB RAM
- On-board sensors
  - Accel/Gyro: ICM-20689
  - Accel/Gyro: BMI055
  - Mag: IST8310
  - Barometer: MS5611
- GPS: ublox Neo-M8N GPS/GLONASS receiver; integrated magnetometer IST8310

## Interfaces

- 8 PWM servo outputs
- 4 dedicated PWM/Capture outputs
- Dedicated R/C input for CPPM
- Dedicated R/C input for Spektrum / DSM and S.Bus with analog / PWM RSSI input
- 3 general purpose serial ports
  - 1 with full flow control
  - 1 with a separate 1A current limit
- 2 I2C ports
- 3 SPI buses
  - 1 internal high speed SPI sensor bus with 4 chip selects and 6 DRDYS
  - 1 internal low noise SPI bus dedicated for Barometer with 2 chip selects, no DRDYS
  - 1 internal SPI bus dedicated for FRAM
  - Supports dedicated SPI calibration FLASH located on sensor module
- 1 CANBuses for CAN ESC
  - CANBus has individual silent controls or ESC RX-MUX control
- Analog inputs for voltage / current of battery
- 1 additional analog inputs

## Electrical Data

### Voltage Ratings

- Power Brick Input: 4.75–5.5V
- USB Power Input: 4.75–5.25V
- Servo Rail Input: 0–24V
- Max current sensing: 120A

## Mechanical Data

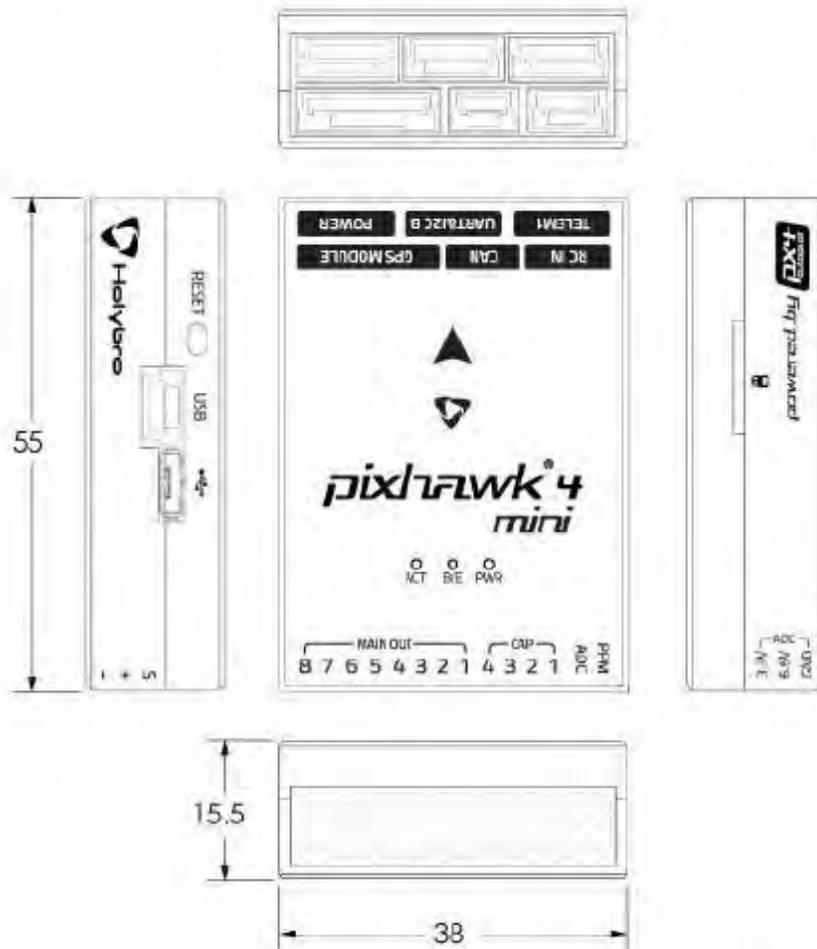
- Dimensions: 38x55x15.5mm
- Weight: 37.2g

## Environmental Data, Quality & Reliability

- Operating temp. -40–85°C
- Storage temp. -40–85°C
- CE
- FCC
- RoHS compliant (lead-free)

# pixhawk<sup>®</sup> 4 mini

## Dimensions



DIMENSIONS IN MILLIMETERS

For more information visit:

[www.dronecode.org](http://www.dronecode.org)

[www.pixhawk.org](http://www.pixhawk.org)

PX4 is a registered Trademark of the Dronecode Foundation. All rights reserved.

Pixhawk and its logo are registered trademarks of Lorenz Meier. All rights reserved.

## 8. Módulo de telemetría wifi



# ESP-12F Datasheet

Version V1

Copyright ©2018

## Features

- The smallest 802.11b/g/n Wi-Fi SOC module
- Low power 32-bit CPU, can also serve as the application processor
- Up to 160MHz clock speed
- Built-in 10 bit high precision ADC
- Supports UART/GPIO/IIC/PWM/ADC
- SMD-22 package for easy welding
- Integrated Wi-Fi MAC/BB/RF/PA/LNA
- Support multiple sleep patterns. Deep sleep current as low as 20uA
- UART baud rate up to 4Mbps
- Embedded LWIP protocol stack
- Supports STA/AP/STA + AP operation mode
- Support Smart Config/AirKiss technology
- Supports remote firmware upgrade (FOTA)
- General AT commands can be used quickly
- Support for the two development, integration of windows, Linux development environment

## Product Specification

Table1.1 Product Specification Description

Module Model	ESP-12F
Package	SMD22
Size	24*16*3(±0.2)mm
Certification	FCC、CE、IC、REACH、RoHS
SPI Flash	Default 32Mbit
Interface	UART/GPIO/ADC/PWM
IO Port	9
UART Baud rate	Support 300 ~ 4608000 bps , Default 115200 bps
Frequency Range	2412 ~ 2484MHz
Antenna	PCB Antenna
Transmit Power	802.11b: 16±2 dBm (@11Mbps) 802.11g: 14±2 dBm (@54Mbps) 802.11n: 13±2 dBm (@HT20, MCS7)
Receiving Sensitivity	CCK, 1 Mbps : -90dBm CCK, 11 Mbps: -85dBm 6 Mbps (1/2 BPSK): -88dBm 54 Mbps (3/4 64-QAM): -70dBm HT20, MCS7 (65 Mbps, 72.2 Mbps): -67dBm
Power (Typical Values)	Continuous Transmission=>Average: ~71mA, Peak: 500mA Modem Sleep: ~20mA Light Sleep: ~2mA Deep Sleep: ~0.02mA
Security	WEP/WPA-PSK/WPA2-PSK
Power Supply	Voltage 3.0V ~ 3.6V, Typical 3.3V, Current >500mA
Operating Temperature	-20 °C ~ 85 °C
Storage Environment	-40 °C ~ 85 °C , < 90%RH

## 9. Batería Li-Po

### ***Pulse Ultra High Output Receiver Battery - High Amperage Ready!***

Pulse Ultra steps up the game with all new 15C high output receiver lipo battery, providing even higher discharge rates for the most demanding RC systems on the planet today!

With a full 15C discharge rate, Pulse Ultra has upped the ante in power output to directly satisfy the growing demand for power hungry RC systems. With this new 15C output, Pulse Ultra provides all the power necessary to keep your electronics happy, allowing maximum amp draw when needed the most.

Available in a wide array of capacity, Pulse Ultra provides an all new lineup of high energy receiver packs, such as 860mAh, 1350mAh, 2550mAh, 3600mAh, and 5000mAh. This large array of capacity offers maximum flexibility for multitudes of uses, providing you with the perfect battery for your high amperage needs.

Adding even more user friendly features, Pulse Ultra does the hard work for you with a pre-soldered Rx plug, allowing ease of usage out of the box. Further this with a pre-soldered EC3 connector for EC3 Rx based setups, and Pulse Ultra offers the most user friendly layout, saving you time, money and frustration when it comes to tedious & messy soldering.

Don't be held back by conventional low C rating receiver packs. For high draw systems that demand high power output, Pulse Ultra provides the perfect solution with true 15C receiver lipo battery.

#### **Features:**

- PULSE 860mAh 15C 7.4V 2S Receiver LiPo Battery - EC3 Connector
- Designed Specifically for High Amperage RC Systems
- Large Array of Sizes & Voltages, Light Weight & Low Cost
- 5C Charge rates for Ultra fast Charge Times & High Discharge Rates
- Applications: RC Lipo Battery, Receiver Battery, Helicopter Battery, Airplane Battery

#### **Specifications:**

- Voltage | Cell Count : 7.4V 2S Lipo Battery
- Capacity: 860mAh Lipo Battery
- Discharge Rate | Max Burst : 15C | 30C
- Dimensions: 57x30x13mm(LxWxH)
- Weight: 50g
- Balance Tap: JST-XH Connector
- Battery Connector: EC3 Connector & Receiver Plug