

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DRONE DE ALA FIJA PARA EL ESTUDIO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN
PARA LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL
FUNDO ALTAMIRANO - ICA**

**TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

PRESENTADA POR

**Bach. TELLO VARGAS, CARLOS ALFONSO
Bach. HERRERA VICTORIO, EDUARDO GUILLERMO
Asesor: Mg. Ing. PALOMARES ORIHUELA, RICARDO J.
LIMA-PERÚ**

2019

DEDICATORIA

A nuestras familias por el apoyo y estimulo durante toda nuestra carrera y así poder realizar este trabajo, por lo cual les estamos eternamente agradecidos.

Eduardo Herrera Victorio

Carlos Tello Vargas

AGRADECIMIENTOS

Nuestro sincero agradecimiento a nuestra alma mater, por habernos brindado los conocimientos de esta maravillosa carrera; al Licenciado Jorge Alamo Torres por el apoyo ofrecido; y a todas personas que de alguna manera nos apoyaron en el desarrollo de la tesis, entre ellos docentes y familiares.

Eduardo Herrera Victorio
Carlos Tello Vargas

INDICE GENERAL

RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	14
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1. Problematización	15
1.1.1. Problema general	17
1.1.2. Problemas específicos	17
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo general	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3. Justificación	18
1.4. Alcances y Limitaciones de la Investigación.....	19
1.5. Estructura de la Tesis.....	20
CAPITULO II: MARCO TEORICO	22
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	22
2.1.1. Antecedentes Internacionales	22
2.1.2. Antecedentes Nacionales	23
2.2. Óptica de la Investigación	25
2.2.1. Hipótesis General	25
2.2.2. Hipótesis Específicas	25
2.3. Selección de Variables.....	26
Las variables se encuentran detalladas en la tabla 2	26
2.4. Bases Teóricas	26
2.4.1. Vehículo Aéreo no tripulado	26
2.4.1.1. Aplicaciones de los Drones	27

2.4.1.1.1. Aplicación Militar:	27
2.4.1.1.2. Aplicación Civil:	28
2.4.1.2. Clasificación	28
2.4.1.3. Sistema de despegue	30
2.4.1.4. Conceptos aerodinámicos	33
2.4.1.5. Fuerzas que actúan sobre un UAV de ala fija	36
2.4.2 Agricultura de precisión.....	43
2.4.2.1 Proceso manual de estudio de plantaciones	45
2.4.3. NDVI.....	45
CAPITULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL DRONE DE ALA FIJA	48
3.1. Condiciones iniciales	48
3.2. Diseño mecánico.....	49
3.2.1. Selección de material del drone:	49
3.2.2 Diseño del Drone.....	49
3.2.2.1 Diseño del ala	50
3.2.2.2 Diseño del Fuselaje.....	52
3.2.2.3 Diseño de soportes.....	52
3.2.3 Pruebas de esfuerzo	54
3.3. Diseño Eléctrico.....	58
3.3.1. Cálculo de autonomía de vuelo requerida	58
3.3.2. Selección del motor	60
3.3.3. Selección de hélice	62
3.4. Diseño Electrónico.....	63
3.4.1. Elección de sistema de control de vuelo.....	64
3.4.2. Componentes seleccionados para el sistema de vuelo	64
3.4.2.1. Módulo de poder	64
3.4.2.2. Recetor – Transmisor	65

3.4.2.3. Micro servos.....	65
3.4.2.4. Variadores de Velocidad	66
3.4.3. Selección del equipo de adquisición de datos	67
3.5. Diseño Informático	68
3.5.1. Selección de software de control.....	68
3.5.2. Procedimiento de programación de software	69
3.5.2.1 Instalación de firmware	69
3.5.2.2 Configuración del compás	70
3.5.2.3 Calibración Acelerómetros y Nivel	70
3.5.2.4 Modos de vuelo	71
3.6. Implementación mecánica	72
3.7. Implementación Eléctrica	77
3.8. Implementación electrónica.....	80
3.9. Implementación Informática:.....	85
3.9.1. Integración de software con drone	85
3.9.2. Planificación de rutas	86
CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	87
4.1. Pruebas de operatividad	87
4.1.1. Prueba 1	87
4.1.2 Prueba 2	87
4.1.3. Prueba 3	87
4.2. Resultados	88
4.2.1 Resultados de la prueba 1	88
4.2.2 Resultados de la prueba 2	90
4.2.3 Resultados de la prueba 3	92
4.2.4 Resultados de la prueba 4	94
CONCLUSIONES	98

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Plantas de maíz por hectáreas	26
Tabla 2 Selección de variable	26
Tabla 3 Valores de NDVI para esparragos	46
Tabla 4 Comparación entre materiales para fuselaje	49
Tabla 5 Comparativa de modelos comerciales.....	50
Tabla 6 Desplazamiento de drone	59
Tabla 7 Pesos del drone de ala fija.....	60
Tabla 8 Comparativa de motores Bushless	61
Tabla 9 Comparación de tipos de baterías	62
Tabla 10 Comparativa de modelos de baterías.....	63
Tabla 11 Características de controladores de vuelo	64
Tabla 12 Características de Receptor FlySky i6	65
Tabla 13 Características de micro servos.....	66
Tabla 14 Características del ESC.....	66
Tabla 15 Características de cámara digital.....	67
Tabla 16 Comparativo de software de control	68
Tabla 17 Relación de potencia para despegue	91
Tabla 18 Relación de extensión de terreno vs tiempo.....	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Plantación de maíz.....	15
Figura 2 Países que adoptan herramientas aéreas de agricultura	18
Figura 3 Diagrama de la estructura básica de la Tesis	20
Figura 4. Drone militar MQ-9 Reaper.....	27
Figura 5 Configuraciones de los rotores de aeronaves.....	29
Figura 6 Configuraciones de aeronaves de ala fija	30
Figura 7 Fuselaje de aeronaves de ala fija.....	30
Figura 8 Partes de motor Brushless.....	31
Figura 9 Bateria Lipo	31
Figura 10 Controlador ArduPilot	32
Figura 11 Variador de velocidad.....	33
Figura 12 Partes de un perfil aerodinámico	35
Figura 13 Perfil Simétrico.....	35
Figura 14 Perfil Asimétrico.....	35
Figura 15 Fuerzas que actúan en un aeroplano	38
Figura 16 Ejes de traslación y rotación de un aeroplano.....	41
Figura 17 Superficies de control de aeronaves.....	43
Figura 18 Imagen multibanda	43
Figura 19 Reflectancia de terreno	44
Figura 20 Jornaleros.....	45
Figura 21 Reflectancia de una banda 2	46
Figura 22 Simulación en software XFLR5	47
Figura 23 Perfil aerodinámico creado con el software XFLR5.....	50
Figura 24 Diseño de ala en el software XFLR5	51
Figura 25 Datos ingresados para el diseño.....	51
Figura 26 Modelo 3D de ala	51
Figura 27 Entorno grafico de diseño de fuselaje.....	52
Figura 28: Modelo 3D Final.....	52
Figura 29: Modelo 3D de soporte de cámara	53
Figura 30: Modelo 3D de soporte de motor	53
Figura 31 Modelo 3D de acople Superior	53
Figura 32 Modelo 3D de Acople inferior.....	54

Figura 33 Parámetros de Simulación 100km/h	54
Figura 34 Parámetros de Simulación 35km/h	55
Figura 35 Cálculo de esfuerzos a 35Km/h	55
Figura 36 Simulación de corrientes de viento a 35Km/h	56
Figura 37 Cálculo de esfuerzos a 100Km/h	56
Figura 38 Simulación de corrientes de viento a 100 Km/h	57
Figura 39 Grafico de resultados	57
Figura 40 Plan de vuelo tipo cuadricula.....	58
Figura 41 Descripción del desplazamiento del drone	59
Figura 42 Diseño del motor en 3D	61
Figura 43 Helice GEMFAN 6 x 4	62
Figura 44 Módulo de poder.....	65
Figura 45 M8N GPS	67
Figura 46 Interfaz Mission Planner.....	69
Figura 47 Instalación de firmware	69
Figura 48 Calibración de compás.....	70
Figura 49 Configuración de acelerómetros	70
Figura 50 Configuración de nivel	71
Figura 51 Modos de vuelo	72
Figura 52 Corte laser de perfiles NACA 6412.....	72
Figura 53 Fabricación de ala	72
Figura 54 Corte por hilo caliente	73
Figura 55 Fabricación de agujero para microservo.....	73
Figura 56 Ensamble de fuselaje	74
Figura 57 Ensamblando alas con fuselaje	74
Figura 58 Acoplando alas con fuselaje	75
Figura 59 Cuernos de timon	75
Figura 60 Soporte de componentes	76
Figura 61 Pegado de soporte	76
Figura 62 Drone armado	77
Figura 63 Pesaje del Cuerpo central.....	77
Figura 64 Pesaje de alas del drone	78
Figura 65 Pesaje de cámara digital.....	78
Figura 66 Instalación de motor y hélice.....	79
Figura 67 Instalación de batería	79

Figura 68 Acondicionamiento de conector para ESC	80
Figura 69 Acondicionamiento de conector para cámara	80
Figura 70 Conexión externa de componentes	81
Figura 71 Instalación de micro servos	81
Figura 72 Instalación de variador de velocidad	82
Figura 73 Instalación de módulo de poder	82
Figura 74 Instalación de APM, telemtria y receptor	83
Figura 75 Instalación de GPS	83
Figura 76 Instalación de cámara	84
Figura 77 Sistemas eléctrico y electrónico ensamblados	84
Figura 78 Instalación del firmware	85
Figura 79 Integración de sistemas	85
Figura 80 Planificación de ruta	86
Figura 81 Prueba de elevación de los alerones	88
Figura 82 Prueba de descenso de los alerones	89
Figura 83 Posicionamiento del GPs del drone	89
Figura 84 Posicionamiento en tiempo real	90
Figura 85 Lanzamiento del drone de ala fija	90
Figura 86 Lanzamiento del drone de ala fija	91
Figura 87 Prueba de sustentación del drone de ala fija	92
Figura 88 Plan de vuelo con extensión de 5 Ha	93
Figura 89 Plan de vuelo con extensión de 20 Ha	93
Figura 90 Desplazamiento inicial del drone	94
Figura 91 Desplazamiento final del drone	94
Figura 92 Imagen de cultivo en lima	95
Figura 93 Imágenes obtenidas por el drone	96
Figura 94 Ortofoto del terreno	96
Figura 95 Estudio de índice de vegetación normalizada	97

RESUMEN

La presente Tesis titulada “Diseño e Implementación de un drone de Ala Fija para el estudio de índices de vegetación para la agricultura de precisión en el fundo Altamirano - Ica” comprende el desarrollo y construcción de un drone del tipo monorotor, que permita obtener data, es decir imágenes georreferenciadas, para su procesamiento y aplicación en el área de la agricultura de precisión. Se realizó un diseño mecánico teniendo en cuenta la sustentabilidad de vuelo del equipo, así mismo se diseñaron los sistemas eléctricos y electrónicos para el correcto funcionamiento de los componentes a utilizar en el drone.

El presente estudio se justificó pues posee valor teórico, utilidad práctica, por su conveniencia y en base a los beneficios netos que genera la aplicación de la agricultura de precisión con los estudios de índices de vegetación. El referencial teórico se fundamentó en los conceptos de vehículos aéreos no tripulados y agricultura de precisión, de los cuales se comprende la sinergia de estos dos para el desarrollo de nuestro proyecto.

Como resultado de la presente tesis, se implementó un prototipo capaz de realizar un vuelo preprogramado, el cual obtiene información para luego ser post procesada y obtener los índices de vegetación, abarcando todo un cultivo, de manera rápida y efectiva. Concluyéndose que el uso de vehículos aéreos no tripulados en el campo de la agricultura de precisión es de suma utilidad para prevenir y llevar un control efectivo del cultivo, lo que a su vez conlleva a un incremento en la producción y las ganancias.

Palabras claves: *Drone, mono rotor, georreferenciación*

ABSTRACT

This thesis entitled "Design and Implementation of a fixed-wing drone for the study of vegetation indices for precision agriculture in the Altamirano - Ica farm" includes the development and construction of a single-type drone, which can obtain data, that is, georeferenced images, for processing and application in the area of precision agriculture. A mechanical design was carried out taking into account the sustainability of the flight of the equipment, as well as the electrical and electronic systems for the correct operation of the components to be used in the drone.

The present study was justified because it has theoretical value, practical utility, for its convenience and based on the net benefits generated by the application of precision agriculture with studies of vegetation indices. The theoretical reference is based on the concepts of unmanned aerial vehicles and precision agriculture, of which the synergy of these two is understood for the development of our project.

As a result of this thesis, a prototype capable of performing a pre-programmed flight was implemented, which obtains information to then be post processed and obtain vegetation indices, covering an entire crop, quickly and effectively. Concluding that the use of unmanned aerial vehicles in the field of precision agriculture is of great use in preventing and carrying effective control of the crop, which in turn leads to an increase in production and profits.

Keywords: Drone, monorotor, georeferencing

INTRODUCCIÓN

Una de las áreas más influyentes de la Mecatrónica es su aplicación en el diseño de equipos que faciliten la realización de actividades del ser humano, es por ello que esta tesis se basa en el diseño y la construcción de un equipo aéreo no tripulado, para su aplicación en el sector agrario, específicamente en el área de agricultura de precisión.

La agricultura en el Perú es una actividad económica que está en aumento debido al crecimiento de las exportaciones, por ello los agricultores requieren que sus productos cumplan con estándares de calidad. Esto conllevo a que se empiece a hablar en el país del término Agricultura de Precisión, que implica el uso de la tecnología para la mejora de la producción en los cultivos, asegurando la calidad de las cosechas.

El principal motivo de la investigación se asienta en la utilización de un drone de ala fija que sea capaz de realizar vuelos preprogramados obteniendo data con la cual se realizara el estudio de índices de vegetación en el Fundo Altamirano – ICA. Es por ello que, para un óptimo desarrollo del problema, la investigación se estructuro de la siguiente manera:

CAPITULO I: Planteamiento del problema, donde se considera la problematización, objetivos generales y específicos, las justificaciones, alcances y limitaciones de la investigación.

CAPITULO II: Marco Teórico, donde se considera que los antecedentes de la investigación, sean internacionales y nacionales, óptica de la investigación, selección de variables con sus dimensiones y bases teóricas.

CAPITULO III: Diseño e implementación del sistema automatizado donde se considera el diseño mecánico, diseño eléctrico, diseño electrónico, diseño informático cada uno con sus respectivas implementaciones.

CAPITULO IV: Pruebas y Resultados, donde se comprueban los objetivos propuestos de la presente investigación.

Para finalizar la investigación se redactan las conclusiones, recomendaciones y se describe la referencia bibliográfica utilizada, así como también se considera los anexos con información que valida esta investigación.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática

El Fundo Altamirano es un centro agrícola peruano, ubicado en Ica, que se dedica al cultivo de maíz y espárragos para exportación, por lo que su producción cuenta con altos estándares de calidad, lo cual se demuestra en el seguimiento continuo de sus cultivos teniendo en cuenta el estrés de los cultivos, el estado hídrico de su plantación y detección temprana de enfermedades y plagas. Este fundo no cuenta con la tecnología ni la ingeniería para realizar estos estudios por lo que contrata a la empresa peruana Agrotep S.A. la cual realiza actividades propias del servicio de agricultura de precisión, en específico el estudio de índices de vegetación en fundos. El proceso del estudio de plantaciones es realizado por un grupo de personas liderado por un ingeniero agrónomo, en el cual realizan una inspección visual de las plantaciones para determinar el déficit en el cultivo; de una hectárea de sembrío se escoge una muestra de 40 plantas al azar para realizar dicha inspección. El tiempo que duran en hacer esta medición depende de las hectáreas a inspeccionar y de la geografía del terreno, pero en promedio tiene un avance de 5 hectáreas diarias, lo que equivale a 200 plantas por día.

En la figura 1 se muestra un cultivo de maíz realizado por siembra directa, que tienen una separación de sembrío de 1 metros entre plantas, lo que en una hectárea resulta un aproximado de 80 mil plantas de maíz.



Figura 1 Plantación de maíz

Fuente: <http://www.agroes.es/fotos-videos/fotos/fotos-de-agricultura/maiz/maiz-ya-crecido/cultivo-de-maiz-1-7960#joomimg>

En la tabla N°1 se puede observar que la cantidad de plantas de maíz inspeccionadas en 5 hectáreas de cultivo son 200 de las 400000 plantas existentes, esto refleja un estudio de plantaciones de manera poco efectiva, que a su vez no permite un adecuado tratamiento o detección temprana de plagas, lo que puede significar grandes pérdidas en la producción.

Tabla 1 Plantas de maíz por hectáreas.

	Inspección en un Ha	Cantidad de Ha	Totales
Plantas a inspeccionar	40		200
Plantas sembradas	80000	5	400000
Plantas sin inspección	79960		399800

Fuente: Elaboración Propia

Por ello se ven en la necesidad de contar con una tecnología que les permita realizar sus estudios de manera eficaz, en este caso un drone de ala fija. El uso de esta tecnología permite obtener datos más precisos y rápidos que haciendo una inspección visual de un fundo. Debido a la ubicación de sus clientes que se encuentran ubicados mayormente en la costa peruana se ven en la necesidad de realizar viajes frecuentes para poder darles abasto; sin embargo, no es suficiente para poder cubrir la demanda que existe en el mercado, por lo cual la empresa en mención se ha visto en la necesidad de poder adquirir un drone de ala fija. Los precios de un drone de ala fija rondan entre 5000 - 20 000\$ sin contar los costos de importación. El precio de estos drones tiene un coste elevado debido al desarrollo e integración de su tecnología, también a que son productos importados y no existe actualmente en el mercado peruano otra alternativa que pueda ofrecer los mismos beneficios de este producto.

Para una empresa pequeña este tipo de inversiones tiene un coste muy elevado y con respecto a los ingresos que tiene la empresa se ve obligada a postergar esta compra debido a que no posee el poder adquisitivo para poder invertir y además desconoce de los procedimientos de importación para adquirir uno.

1.1.1. Problema general

¿Cómo diseñar e implementar un drone de ala fija para el estudio de índices de vegetación?

1.1.2. Problemas específicos

- a) ¿Cómo diseñar e implementar un sistema mecánico para el vuelo de un drone de ala fija en el aire?
- b) ¿Cómo diseñar e implementar un sistema electrónico capaz de realizar el control de vuelo para el drone de ala fija?
- c) ¿Cómo diseñar e implementar un sistema eléctrico que cuente con una autonomía de vuelo adecuada para realizar el estudio de índices de vegetación?
- d) ¿Cómo diseñar e implementar un sistema informático que permita realizar el plan de vuelo para el estudio de índices de vegetación?

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un drone de ala fija para el estudio de índices de vegetación.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Diseñar e implementar un sistema mecánico para el vuelo de un drone de ala fija en el aire.
- b) Diseñar e implementar un sistema electrónico capaz de realizar el control de vuelo para el drone de ala fija.
- c) Diseñar e implementar un sistema eléctrico que cuente con una autonomía de vuelo adecuada para realizar el estudio de índices de vegetación.
- d) Diseñar e implementar sistema informático que permita realizar el plan de vuelo para el estudio de índices de vegetación.

1.3. Justificación

La existencia de los problemas ya mencionados con respecto a las implicancias de desarrollar correctamente los estudios de índices de vegetación en el Fundo Altamirano y de la empresa Agrotep S.A. para poder adquirir un drone de ala fija creo la necesidad de implementar una solución usando diferentes tecnologías y de menor coste.

En el caso de la empresa Agrotep S.A, no posee precedentes en el desarrollo de drones de ala fija, por lo que la importancia de esta investigación yace en los resultados que servirán de prototipo para la masificación de una solución real.

Por otro lado, ya que el presente proyecto de tesis tiene como finalidad desarrollar el diseño e implementación de un drone de ala fija para el estudio de índices de vegetación para la agricultura de precisión en el fundo Altamirano, la solución considerara detalles de configuración auténticos; los cuales podrían validar la aplicación de esta solución para otros casos de la misma necesidad e incluso de forma masificada (ver figura 2) lo que en consecuencia seria incluso una gran oportunidad de negocio.

Así mismo, es importante indicar que la solución planteada es conveniente dado que Agrotep S.A no posee un Drone de ala fija para realizar sus servicios a sus clientes con fundos extensos por ello, la propuesta de desarrollar un drone de ala fija se puede acoplar fácilmente a los servicios que ya vienen realizando y además se podría medir los resultados del prototipo desarrollado.



Figura 2 Países que adoptan herramientas aéreas de agricultura

Fuente: <http://www.ipsosconsulting.com/pdf/Ipsos-Business-Consulting-Commercial-Drone-Adoption-in-Agribusiness.pdf>

Finalmente, es importante destacar que el éxito de esta investigación brindará a las empresas dedicadas al rubro de agricultura de precisión una herramienta poderosa para un

mejor estudio de los índices de vegetación, traducido en una reducción de costos y una mayor conformidad de sus clientes.

1.4. Alcances y Limitaciones de la Investigación

La presente tesis consiste en el diseño e implementación de un drone de ala fija para el estudio de índices de vegetación en el fundo Altamirano, aplicando conceptos de ingeniería mecánica, eléctrica y electrónica. Se implementa el diseño teniendo en cuenta el costo de los componentes seleccionados, para luego compararlo con un equipo (drone) comercial y justificarlo a través del impacto económico.

Sus características principales son las siguientes:

- Un sistema eléctrico para alimentación del equipo.
- Un sistema electrónico para el control de los componentes.
- Un sistema mecánico para sustentabilidad del equipo.
- Estudio de índice de vegetación normalizada (NVDI).

Los inconvenientes y limitaciones que se presentaron fueron los siguientes:

- El tiempo de demora en la importación de los materiales.
- La elaboración de una configuración eléctrica y electrónica teniendo como factor limitante el peso del drone.
- Bajo expertis en la manipulación de drones de ala fija.
- Se tuvo que viajar a Ica 4 veces con vehículo propio para realizar las pruebas los fundos.
- Debido a los accidentados aterrizajes del drone que se tuvieron durante las pruebas, se tuvo que cambiar acoplos y componentes.

1.5. Estructura de la Tesis

La tesis se encuentra dividida en cuatro (04) capítulos, referencias bibliográficas y anexos, tal como se muestra en la figura 3.

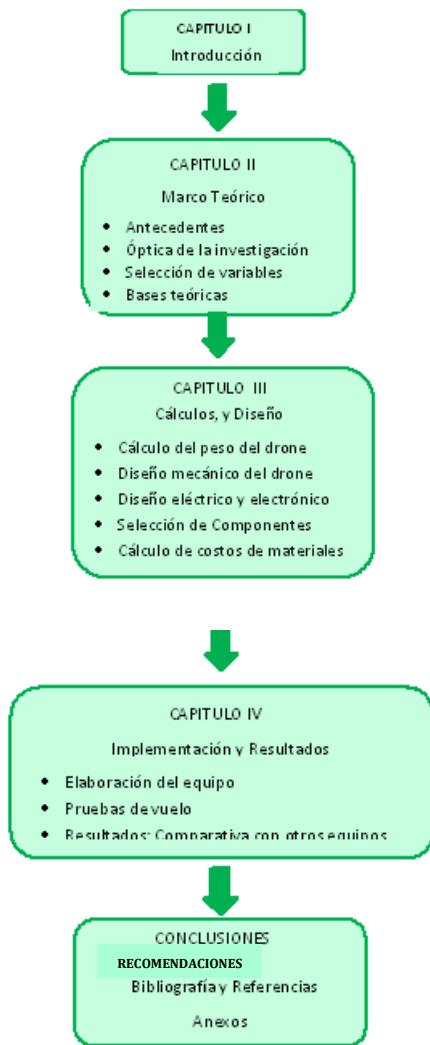


Figura 3 Diagrama de la estructura básica de la Tesis

Fuente: Elaboración Propia

La estructura de la tesis responde a la resolución secuencial del problema de diseño e implementación de un drone de ala fija para el estudio de índices de vegetación en el fundo Altamirano. A continuación, se describe la composición de los cuatro capítulos y un breve resumen del mismo.

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se expone una introducción a la tesis, el planteamiento del problema, los objetivos de la misma y la justificación de la investigación. Asimismo, se describe la estructura de la tesis, dando a conocer el contenido de cada uno de los capítulos.

Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se describe los antecedentes, la óptica de investigación, la selección de variables y conceptos teóricos que enmarcan la presente investigación. Asimismo, se hace referencia a los drones, su historia, clasificación, aplicaciones y sus principales componentes. Por otro lado, se describe los principales conceptos aerodinámicos a tener en cuenta para la selección del perfil alar a utilizar. Por último, se hace referencia al estudio de índices de vegetación, su división, los productos generados por esta.

Capítulo 3. Cálculos y Diseño

En este capítulo se describe el diseño primeramente mecánico del drone de ala fija, teniendo en cuenta el dimensionamiento de este. Seguidamente los diseños tanto eléctricos como electrónicos, en donde con la selección de cada uno de los componentes a usar se calcula el consumo de energía para calcular la capacidad de amperaje de la batería. Además, se describe el diseño informático del drone. Finalmente, luego de todos los diseños y cálculos se procede a la implementación y ensamblaje de todas las partes.

Capítulo 4. Implementación y Resultados

En este capítulo se muestra el proceso de implementación del drone de ala fija, así mismo se describe ciertas complicaciones al momento de realizar este trabajo. Se hace el cálculo final del presupuesto para la realización del equipo. Finalmente se muestran los resultados de un estudio de índices de vegetación mediante el uso de una cámara digital, finalmente lo desarrollado en la presente tesis como justificación solvente de la tesis.

Conclusiones y Recomendaciones

Finalmente, se presenta las conclusiones de la investigación que determinan la aceptación de la hipótesis general y las específicas.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

En el presente capítulo se mencionan los antecedentes de la investigación que se toman como referencia y base para la aplicación del diseño e implementación de un drone de ala fija para el estudio de índices de vegetación para la agricultura de precisión en el fundo Altamirano. Asimismo, se menciona y describe la óptica de la investigación, en el cual se define la hipótesis de la investigación.

También se realiza la selección de variables que definen el diseño de los sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos. Finalmente, como parte fundamental del capítulo, se presentan las bases teóricas que sustentan y complementan los tópicos que se utilizaron y aplicaron para el desarrollo de la tesis.

2.1. Antecedentes de la Investigación

Debido a los diversos tópicos de alta importancia referidos a la presente tesis, se presenta los siguientes antecedentes internacionales y nacionales que tienen relación con los vehículos aéreos no tripulados, y la agricultura de precisión, teniendo en cuenta el estudio de índices de vegetación.

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Díaz García-Cervigón, Juan José (2015). En su tesis para obtener el Máster en Tecnología de la Información Geográfica titulada: “Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión”. Universidad Complutense de Madrid – Madrid, España, concluye que: los UAS/RPAS suponen una alternativa a la cartografía tradicional, mejorando notablemente los rendimientos y permitiendo accesibilidad a zonas peligrosas y complejas. Los UAS/RPAS son una herramienta más precisa y económica que la fotogrametría (topografía) convencional, debido a su facilidad de planificación de vuelo y rápido registro de imágenes. Obteniéndose precisiones y resoluciones mucho mayores que a partir de fotogrametría convencional. (p. 67)

Escamilla, R (2010). En su tesis para obtener el título de Ingeniero en Control y Automatización titulada: “Diseño, Construcción, Instrumentación y Control de un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)” Instituto Politécnico Nacional – México D.F., México, concluye que: tener un conocimiento de los principales factores aerodinámicos y de las diferentes estrategias de control existentes es fundamental para poder llegar a controlar un vehículo con características iguales o similares de manera eficaz y eficiente. La finalidad de construir físicamente el prototipo y realizar las pruebas de vuelo correspondientes es corroborar que el diseño, la instrumentación y el control utilizados están funcionando en conjunto para lograr los objetivos planteados en un inicio de la tesis. (p. 67-68)

Medina, P, Niño J, (2017). En su tesina para obtener la especialización en Gestión de proyectos de ingeniería titulada “Diseño de un modelo de agricultura de precisión utilizando drones y un sistema de captura, almacenamiento y análisis de datos que permita identificar a tiempo la generación de la pudrición del cogollo en cultivos de palma de aceite que se encuentran en los departamentos de Bolívar y Santander” de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, concluye que : Es importante que se oriente a los productores no solo sobre la importancia de incorporar nuevas metodologías en este tipo de cultivos, sino que ellos puedan conocer como las últimas tecnologías y nuevos desarrollos pueden ser utilizados para su beneficio. Es claro que mediante la implementación de proyectos de este tipo en Colombia representan una excelente oportunidad de crecimiento económico donde no solo ganan los productores si no también los proveedores de tecnología y las empresas de servicio. Este trabajo en conjunto puede ayudar a que a futuro se produzcan mejores insumos que le permitan al país ser un referente a nivel internacional por la calidad del aceite de palma que se exporta (p. 70

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Gómez, M (2005). En su tesis de pregrado para optar por el título de Ingeniero Industrial y de Sistemas, Titulado “Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales” de la Universidad de Piura, Piura. Donde se realiza un

estudio que busca determinar a través de las imágenes satelitales las variaciones de vegetación más significantes que han afectado la costa norte peruana mediante índices de vegetación. En sus conclusiones más importantes manifiestan que:

- A partir del análisis y procesamiento de imágenes satelitales se puede obtener información valiosa referente al uso y cobertura del suelo; específicamente, la cobertura vegetal puede ser cuantificada y monitoreada. Esto se ha realizado para el área del extremo norte del Perú (Piura y Tumbes), estimamos que esta metodología sea de beneficio para el manejo adecuado de este importante recurso. (p.96)
- Los NDVI pueden ser utilizados para determinar detalladamente el tipo de cultivos en zonas agrícolas. En este trabajo se dan a conocer los rangos de valores del NDVI para la zona del Bajo Piura, pero no se clasifican estos valores para cada especie por no ser el objetivo final del mismo. (p.97).

Rabanal, Danna (2011). En su tesis para obtener el título de Ingeniero Electrónico titulado: “Integración de un sistema UAV con control autónomo en un equipo aéreo para agricultura de precisión”. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, concluye que: la aplicación práctica de la electrónica en los sistemas UAV con control automático en un equipo aéreo es una mejor herramienta tecnológica respecto al sistema con radio control. El presente estudio evalúa las diferentes alternativas tecnológicas de los fabricantes cuyos productos poseen las mismas características en hardware, siendo el software quien determina la mejor alternativa del sistema UAV. El sistema UAV ArduPilotMega, brinda la mejor alternativa de edición del código del programa, simulación, compilación, interfaz gráfica (GCS) y control total del aeromodelo antes y durante el vuelo de trabajo. Con pre programación de los planes de vuelo se puede visualizar la optimización de la trayectoria, con ella se demuestra la superioridad del sistema frente a los métodos convencionales de Radio Control. En el presente estudio se empleó un sistema UAV ArduPilot Mega de bajo costo aproximadamente \$500, que lo hace accesible y competitivo frente a otros sistemas UAV comerciales (Micropilot, UAV Navigator, etc). Se comprobó que mediante el modo estabilización se obtiene una trayectoria del aeromodelo recta y estable, lo que reduce los errores de rotación

producidos en las imágenes registradas por el mismo y también reduce el número de imágenes desecharas por este motivo. (p. 58)

Chavez - Arroyo, R. Rodriguez, W (2018). En su tesis para obtener el título de Ingeniero Mecatrónico titulado: “Diseño e implementación de un drone hexacóptero con software de geolocalización para señalizar puntos de siembre en el fundo de palma aceitera witpalm”. Universidad Ricardo Palma, Perú, concluye que: La aplicación y uso de los drones en la agricultura permite que la carrera de Ingeniería mecatrónica se convierta en generadora de nuevas soluciones tecnológicas que beneficiarán a los agricultores de manera económica, ambiental y tecnológica. Por lo expuesto anteriormente se considera indispensable que se implemente un laboratorio experimental de drones con la finalidad que los estudiantes puedan realizar proyectos y temas de investigación. (p.113)

2.2. Óptica de la Investigación

2.2.1. Hipótesis General

Es posible diseñar e implementar un drone de ala fija para el estudio de índices de vegetación en la agricultura de precisión.

2.2.2. Hipótesis Específicas

- a) Es posible diseñar e implementar un sistema mecánico para el vuelo de un drone de ala fija en el aire de forma exitosa.
- b) Es posible diseñar e implementar un sistema electrónico capaz de realizar el control de vuelo para el drone de ala fija de forma exitosa.
- c) Es posible diseñar e implementar un sistema eléctrico que cuente con una autonomía de vuelo adecuada para realizar el estudio de índices de vegetación de forma exitosa.
- d) Es posible diseñar e implementar sistema informático que permita realizar el plan de vuelo para el estudio de índices de vegetación de forma exitosa.

2.3. Selección de Variables

Las variables se encuentran detalladas en la tabla 2.

Tabla 2 Selección de variable

Variables	Dimensiones
Vehículos Aéreos no Tripulados	Velocidad de giro de motor
	Tiempo de autonomía de drone
Agricultura de precisión	NDVI
	Área de la biomasa

Fuente: Elaboración Propia

2.4. Bases Teóricas

Dentro del marco del estudio resulta importante abarcar los tópicos relacionados a la presente tesis. Es así como el marco teórico del estudio comprende la siguiente división de sustentos teóricos que ayudarán a entender y complementar la investigación.

Se inicia por la teoría relacionada a los vehículos aéreos no tripulados, sus diversas aplicaciones, y clasificación, los cuales ayudarán a visualizar el contexto actual y la importancia que tiene esta tecnología en nuestro país y a nivel mundial.

Se procede a una explicación breve de la agricultura de precisión, su aplicación y el índice de vegetación normalizado. Ello comprende un punto importante del marco teórico ya que es la aplicación en la cual se desarrolla la tesis.

2.4.1. Vehículo Aéreo no tripulado

“Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicles, han sido un área de investigación muy activa durante los últimos años. Son aeronaves capaces de volar sin necesidad de un piloto humano abordo que las controle. Pueden ser remotamente controlados o volar de forma autónoma basada en planes de vuelo preprogramados mediante el uso de sistemas de control complejos. La autonomía se relaciona con los algoritmos de control que poseen estos vehículos para

responder de manera satisfactoria al encontrarse en eventos inesperados o aleatorios, durante sus misiones de vuelo” (Escamilla, 2010, p.10).

2.4.1.1. Aplicaciones de los Drones

El uso de drones se ha generalizado en la actualidad por lo que tienen aplicación en diferentes campos, pero se puede separar en dos categorías de aplicación: la civil y la militar.

2.4.1.1.1. Aplicación Militar:

La cualidad más importante de los drones es el vuelo no tripulado. Esta característica permite evitar cualquier posible riesgo para el piloto, principalmente en el dominio militar como en misiones en áreas hostiles, así como en misiones en las que se demande una importante carga y daño psicológico para el piloto: acceso a las altitudes o vigilancia repetitiva (ver Figura 4).

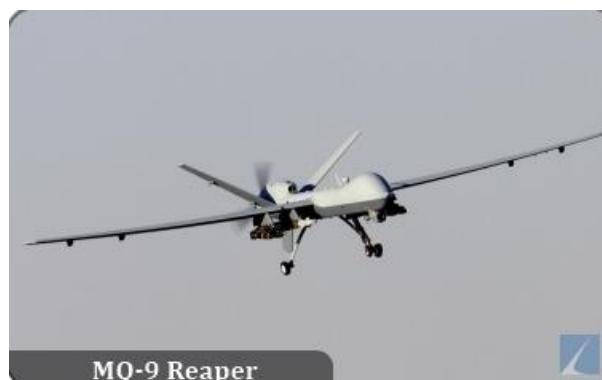


Figura 4. Drone militar MQ-9 Reaper

Fuente: <http://www.fi-aeroweb.com/Defense/MQ-1-Predator-MQ-9-Reaper.html>

Los avances tecnológicos ayudan para ampliar el rango de aplicaciones de los sistemas autónomos: en acciones militares de vigilancia y seguimiento de posiciones enemigas, creando enlaces de comunicación entre estaciones terrestres para el intercambio de información. Las aplicaciones de los drones militares pueden dividirse en tres categorías:

- Patrullaje y reconocimiento
- Apoyo al combate
- Combate

2.4.1.1.2. Aplicación Civil:

Debido al potencial, versatilidad y fácil operación, existen diversas aplicaciones para los UAVs no tripulados civiles. De la misma manera que en el dominio militar, los ejemplos de aplicación se pueden clasificar en diferentes categorías:

- Investigación científica
 - Estudio de la atmósfera
 - Cartografía
- Apoyo a desastres
 - Búsqueda y rescate en terremotos
 - Volcanes
- Vigilancia civil
 - Supervisión marítima
 - Vigilancia urbana

2.4.1.2. Clasificación

No existe una clasificación única de UAVs a nivel mundial, debido a que es un área relativamente nueva, aunque es posible dividirlos en dos grandes grupos basándose en su principio de funcionamiento (Austin, 2010, p.25):

- **UAV de ala rotatoria**

“También llamados UAV de despegue y aterrizaje vertical (Vertical take-off and landing, VTOL), los cuales poseen ventajas en su capacidad de permanecer en el aire y tener alta manejabilidad. Cambian su nombre dependiendo de la configuración de sus rotores, pueden ser de un solo rotor, rotor coaxial, rotor en tandem o multi rotor, como se puede observar en la figura 5.

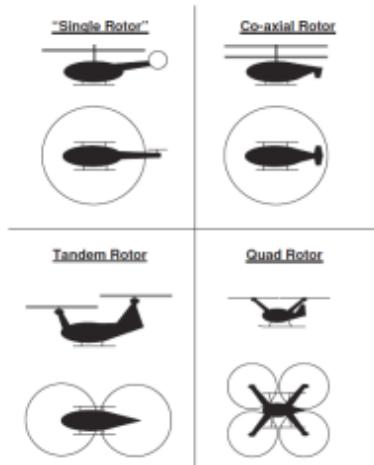


Figura 5 Configuraciones de los motores de aeronaves

Fuente: Austin, R (2010). Unmanned Air Systems Design, Development, John Wiley & Sons Ltd.

La configuración de un solo rotor es básicamente un helicóptero como lo conocemos, debe poseer un rotor en la cola para contrarrestar el torque generado por el rotor principal, la aeronave es extremadamente asimétrica en todos los planos por lo que resulta más difícil de controlar.

La configuración en tandem utiliza dos motores más pequeños en lugar de uno más grande para generar el levantamiento, de igual forma que con un motor, es asimétrico por lo que controlarlo resulta difícil, aunque en términos de consumo de energía es más eficiente.

La configuración de motores coaxiales posee, como su nombre lo dice, dos motores en el mismo eje, es simétrica y esto reduce la complejidad de su control.

Los multi-motores son de diversos tipos, en función del número de motores independientes que poseen. Actualmente existe una gran variedad, entre los que destacan cuadricópteros y hexacópteros, de 4 y 6 motores respectivamente, en el mercado se puede encontrar una gran variedad de modelos” (Santamaría, 2014).

• UAV de ala fija

“Se refiere a aviones (con alas) que requieren de una pista para despegar y aterrizar, o un lanzamiento de catapulta, estos generalmente tienen una gran autonomía y pueden volar a altas velocidades. Se reducen fundamentalmente a tres

tipos, determinados por medio del balance levantamiento/masa y por su estabilidad y control. Estos son: “Tailplane aft” (estabilizador en popa), “Tailplane forward” (estabilizador adelante) y “Tailless” (sin cola)” (ver Figura 6) (Santamaría, 2014).

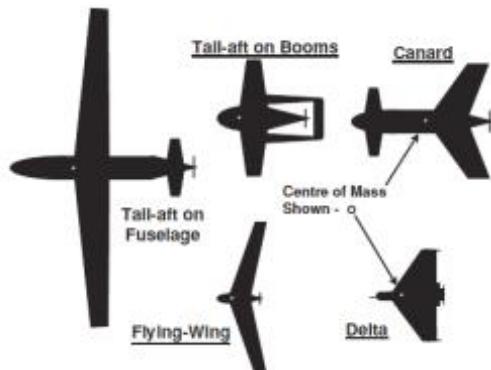


Figura 6 Configuraciones de aeronaves de ala fija

Fuente: Austin, R (2010). Unmanned Air Systems Design, Development, John Wiley & Sons Ltd.

2.4.1.3. Sistema de despegue

- **Fuselaje**

Conocido como fuselaje o cuerpo del avión, ver figura 7. Su función principal es servir de soporte principal al resto de los componentes del aeroplano. La forma del fuselaje se determina normalmente por la misión de la aeronave. Los fuselajes que ofrecen una menor resistencia aerodinámica son los de sección circular, elíptica u oval, y de forma alargada (Muñoz, 2013, p.14).



Figura 7 Fuselaje de aeronaves de ala fija

Fuente: <https://www.rcdrone.cl/producto/fuselaje-phantom-wing-v2/>

- **Motores**

El accionamiento de los rotores se realiza mediante motores brushless (motores sin escobilla), como se muestra en la figura 8. Este tipo de motores son similares a los de corriente continua en el sentido de que usan bobinas e

imanes para mover el eje, pero no cuentan con escobillas en el mismo. La función de las escobillas en los motores de corriente continua clásicos es la de cambiar la dirección de la corriente que circula por sus bobinas.

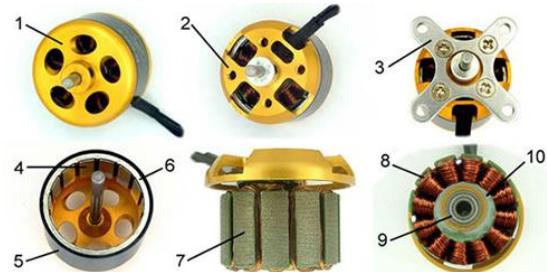


Figura 8 Partes de motor Brushless

Fuente: <http://www.systematic.com.ar/diseno-y-fabricacion-de-un-motor-brushless/>

- **Batería**

Uno de los principales problemas de los vehículos aéreos no tripulados lo constituye el sistema de alimentación de energía. Dada la construcción de los motores que se usan en este tipo de dispositivos y la presencia de bobinas en los mismos (las bobinas se oponen a cambios en la corriente que circula por ellas), la fuente de alimentación debe suministrar unas intensidades de corriente relativamente grandes para lo que suelen dar las baterías estándar. Además, conviene que el peso añadido por las baterías sea el menor posible, puesto que los motores tendrán que vencer una fuerza de peso mayor.

En consecuencia, las baterías más recomendadas para este tipo de aplicaciones son las de tipo Lipo, como se muestra en la figura 9. (Muñoz, 2013, p.18).



Figura 9 Bateria Lipo

Fuente: <http://electronicarc.com/catalogo/gens-ace-5300mah-111v-3060c-3s1p-bateria-lipo-p-1525.html>

- **Controlador de vuelo**

Uno de los factores importantes que asegura la estabilidad de los drones son los controladores de vuelo. Una persona no sería capaz de controlar individualmente cada uno de los motores de un drone para siquiera estabilizarlo, ni mucho menos lograr un movimiento definido. Los controladores de vuelo utilizan una unidad de vuelo inercial y un procesador que contiene un algoritmo de control el cual coordina la velocidad de todos los motores en función a un modelo dinámico establecido. De esta manera, el piloto solo tiene que introducir como datos las velocidades en determinada dirección y el controlador se encarga de calcular la velocidad necesaria en cada motor. También es posible prescindir del piloto humano si el controlador de vuelo es equipado con un GPS, como se puede ver en la figura 10. El controlador es programado con un plan de vuelo diseñado previamente y sin posibilidad de cambio durante el vuelo (Ojeda, 2016), de manera que el VANT sigue las coordenadas marcadas de forma autónoma y aterriza finalmente en el lugar designado.

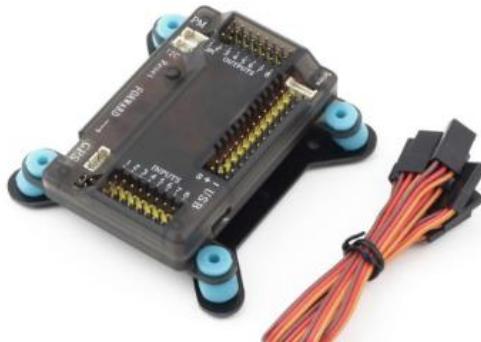


Figura 10 Controlador ArduPilot

Fuente: <http://www.roboticacnc.com.mx/productos/robotica/Drones>

- **Variador de Velocidad (ESC)**

Los motores brushless requieren de controladores electrónicos para regular su velocidad de giro, como se muestra en la figura 11. Además, este tipo de motores suelen ser, normalmente trifásicos, por lo que no funcionan con corriente continua. Por lo tanto, nuestro controlador de velocidad estará

conectado a una batería de corriente continua y tendrá una salida trifásica que conectaremos al motor (Muñoz, 2013, p.20).



Figura 11 Variador de velocidad

Fuente: <http://www.dronetrest.com/t/what-to-consider-when-buying-a-esc-for-your-multirotor/1305>

2.4.1.4. Conceptos aerodinámicos

Al pensar en el diseño de aeronaves ya sea a tamaño real o escala, se deben considerar diferentes conceptos y parámetros aerodinámicos, los cuales varían de acuerdo a la aplicación, tamaño, forma, peso, velocidad, etc. del vehículo.

Los conceptos considerados para el desarrollo de este prototipo son los siguientes:

- Geometría y configuración del ala
- Fuselaje
- Principales fuerzas que actúan sobre un avión
- Centro de gravedad
- Centro de presión
- Centro aerodinámico
- Ángulo de ataque
- Diedros
- Ejes de translación y rotación de la aeronave
- Principales superficies de control de un avión
- Softwares para el diseño de perfiles aerodinámicos

Una vez conocidos cuales son los parámetros aerodinámicos que considerar en el diseño del vehículo, se procede a dar una breve explicación de cómo influyen cada uno de ellos en el control, estabilidad y vuelo de una aeronave.

Geometría y configuración del ala

Existen diversas configuraciones y tamaños de ala, donde el diseño de está depende de la aplicación a realizar por el UAV. Para vuelos a bajas velocidades, las alas rectangulares son adecuadas ya que oponen una mayor resistencia al flujo de aire. De lo contrario, por ejemplo, un ala con geometría triangular o delta es más conveniente para vuelos rápidos. Independientemente de la congelación empleada, un factor importante a considerar es el área de la superficie del ala ya que de esto dependerá la sustentación del avión.

Perfil Aerodinámico

Un perfil aerodinámico es una superficie de forma plana que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que generen una sustentación. Los parámetros que influyen en un perfil aerodinámico, como se observa en la figura 12, son los siguientes:

Línea de cuerda es la línea recta que une el borde de ataque o borde delantero del ala y el borde de fuga o borde de salida del perfil.

- Borde de Ataque. Es el borde delantero del ala. Es la parte del ala que primero entra en contacto con el flujo de aire.
- Borde de Fuga o Borde de Salida. Es la parte posterior del ala por donde sale el flujo de aire.

Cuerda es la longitud de la línea de cuerda. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.

Línea de curvatura media es la línea media entre la superficie superior también conocida como extradós y la superficie inferior también conocida como intradós.

Curvatura máxima es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda.

Espesor máximo es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós).

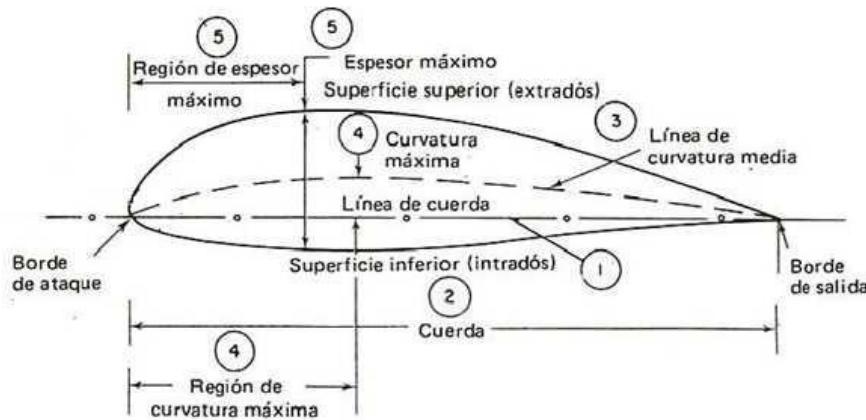


Figura 12 Partes de un perfil aerodinámico

Fuente: <http://joyplanes.com/perfil-alar-aerodinamica-aviones/>

Los perfiles aerodinámicos se pueden dividir en dos grandes grupos:

Perfiles Simétricos son aquellos en los cuales su superficie superior es igual a la inferior. Una ventaja de este tipo de perfiles es que su construcción es sencilla (figura 13).

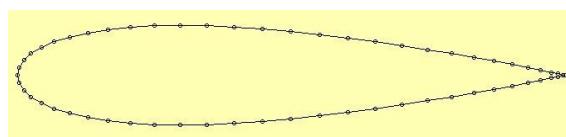


Figura 13 Perfil Simétrico

Fuente: <http://www.takeoffbriefing.com/teoria-de-la-sustentacion-porque-vuela-un-avion/>

Perfiles Asimétricos son aquellos en los cuales sus superficies son distintas ya que cuentan con una curvatura (Figura 14). Este tipo de perfiles cuentan con una mayor sustentación en comparación con los perfiles simétricos.

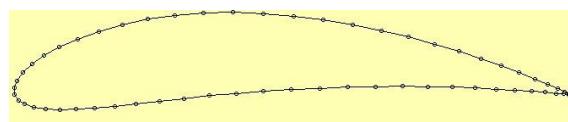


Figura 14 Perfil Asimétrico

Fuente: <http://www.takeoffbriefing.com/teoria-de-la-sustentacion-porque-vuela-un-avion/>

Todos los perfiles aerodinámicos cuentan con un número de serie llamado NACA, mediante el cuales se pueden conocer los principales parámetros aerodinámicos bajo los cuales fue diseñado el perfil aerodinámico.

El perfil aerodinámico empleado para la construcción del ala de los prototipos es el NACA 6412 de la serie de 4-dígitos, cuyo perfil es asimétrico ya que nos brinda una sustentación mayor.

La NACA (National Advisory Committee for Aeronautics: Comité Consejero Nacional para la Aeronáutica) fue una agencia federal de Estados Unidos fundada el 3 de marzo de 1915 para emprender, fomentar, e institucionalizar las investigaciones aeronáuticas. La NACA desarrolló la serie de cuatro dígitos, siendo así la primera familia de superficies de sustentación. El primer dígito especifica la inclinación máxima m en porcentaje de la cuerda (longitud aerodinámica), el segundo indica la posición de la curvatura máxima p en décimas de cuerda, y los dos últimos números nos proporcionan el máximo espesor t de la superficie de sustentación en términos de porcentaje. Por ejemplo, el perfil aerodinámico NACA empleado es el 6412, el cual tiene una inclinación máxima del 6 %, con una curvatura máxima de 4mm y un espesor máximo de 12 %.

Hoy en día, el diseño aerodinámico se realiza con los recursos computacionales disponibles ya que permiten al diseñador, diseñar y optimizar rápidamente un perfil aerodinámico de acuerdo a la aplicación requerida, en lugar de hacer una selección de una familia existente.

2.4.1.5. Fuerzas que actúan sobre un UAV de ala fija

Una fuerza puede ser pensada como un empujón o un tirón en una dirección específica. Una fuerza es una magnitud vectorial, por lo que la fuerza tiene una

magnitud, una dirección y un sentido. Las cuatro principales fuerzas que actúan sobre un avión durante su vuelo (Figura 15) son las siguientes:

Levantamiento

El Levantamiento (Lift) es una fuerza aerodinámica generada por un objeto sólido que se mueve a través de un fluido, en este caso el aire; es decir, es la fuerza que sostiene al avión en el aire y es generado por cada parte del mismo, pero principalmente por el ala y es perpendicular a la dirección del flujo. La magnitud del vector de levantamiento depende de varios factores como la forma, tamaño y velocidad del avión.

Peso

El Peso (Weigh) es la fuerza causada por la atracción gravitacional de la tierra sobre el avión y su dirección siempre apunta hacia el centro de la tierra. Sin embargo, a menudo el peso actúa sobre un único punto llamado centro de gravedad. En vuelo, el avión gira alrededor del centro de gravedad. La magnitud del vector de peso depende de la masa de todas las partes del avión que se encuentran distribuidas en el mismo.

Arrastre

El Arrastre (Drag) es la fuerza aerodinámica generada por la resistencia que opone el aire al movimiento del avión. El arrastre es opuesto a la dirección de vuelo. Al igual que en la fuerza de sustentación, hay varios factores que afectan la magnitud de la fuerza de arrastre incluyendo la viscosidad del aire, la velocidad y la configuración o forma del avión. La fuerza de arrastre actúa hacia un punto del avión llamado centro de presión.

Empuje

El Empuje(Trust) es la fuerza mecánica generada por el motor y la hélice para mover el avión a través del aire. La dirección de la fuerza de empuje depende

de la posición de los motores en la aeronave y su magnitud depende del sistema de propulsión empleado, en nuestro caso, depende de la del motor.

El movimiento del avión a través del aire depende de la dirección de las cuatro fuerzas. Si las fuerzas se encuentran en equilibrio, el avión volará a una velocidad constante, de lo contrario si las fuerzas no están equilibradas, el avión acelerará en la dirección donde se encuentre la fuerza de mayor magnitud.

Para mantener en equilibrio al UAV es necesario cumplir las siguientes condiciones:

$$\text{Fuerza de elevación} = \text{Peso} \quad (\text{Lift} = \text{Weight})$$

$$\text{Fuerza de empuje} = \text{Fuerza de Arrastre} \quad (\text{Thrust} = \text{Drag})$$

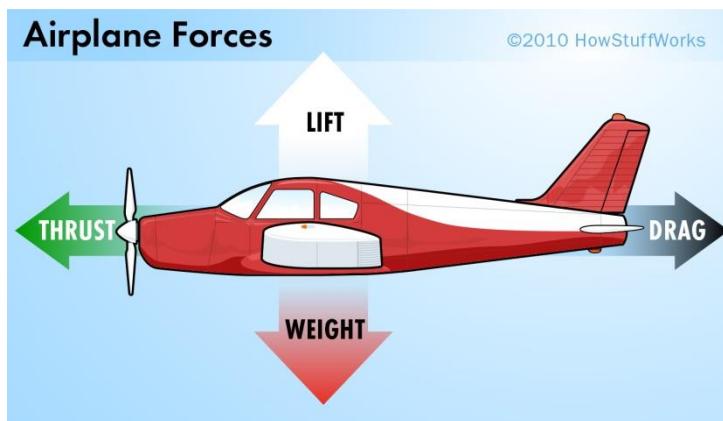


Figura 15 Fuerzas que actúan en un aeroplano

<https://misterstepan.wordpress.com/2016/10/21/a-question-from-patrick/>

Centro de gravedad

El avión durante su vuelo puede realizar maniobras usando las superficies de control (elevador, timón y alerones), las cuales modifican la posición del vehículo. Al ocurrir esto, el avión rota alrededor de un punto llamado centro de gravedad denotado por las siglas CG. En este punto se encuentra el

promedio del peso total del avión que por lo general se encuentra a un tercio del borde principal del ala. Un aspecto que se debe tener presente es que el centro de gravedad afecta considerablemente el equilibrio del avión por lo cual debe estar correctamente ubicado.

Centro de Presión

El Centro de Presión denotado por las siglas CP es el punto resultante generado por la suma total de todas las presiones que se producen sobre la superficie del ala. Cuando un objeto se mueve a través de un fluido, la velocidad del fluido varía alrededor de la superficie del objeto. La variación de la velocidad produce una variación de la presión en la superficie del objeto.

Si se cuenta con un perfil asimétrico como es el caso, el centro de presión se mueve a lo largo de una línea imaginaria en el ala dependiendo de la variación del ángulo de ataque. Si el ángulo de ataque se incrementa, el centro de presión se mueve hacia adelante y si el ángulo de ataque disminuye el centro de presión se mueve hacia atrás.

Centro Aerodinámico

Se ha encontrado experimentalmente y teóricamente que, si la fuerza aerodinámica se ubica a 1/4 del borde principal del ala en los aviones de baja velocidad, la magnitud del momento aerodinámico permanece casi constante con el ángulo de ataque, por lo tanto, el Centro Aerodinámico denotado por las siglas AC, es el punto donde el momento aerodinámico permanece constante. Para perfiles simétricos, el centro aerodinámico es cero independientemente del cambio del ángulo de ataque. Para perfiles con curvatura el AC es diferente de cero y constante para perfiles delgados. En el caso de alas rectangulares el centro del ala es el mismo que su centro aerodinámico. Pero para alas con diferentes configuraciones (triangular, trapezoidal, etc.) es necesario obtener un promedio de toda el ala para encontrar su AC.

Angulo de ataque

Cuando el avión se mueve a través del aire, esté se posiciona con cierto ángulo en dirección al vuelo. El ángulo entre la línea de cuerda y la dirección del vuelo es llamado ángulo de ataque y tiene un amplio efecto sobre el levantamiento generado por el ala.

Para fuselajes delgados, la fuerza de levantamiento (Lift) es directamente proporcional al ángulo de ataque para ángulos pequeños comprendidos entre +/- 10 grados.

Diedros

El diedro tiene como principal función mejorar la estabilidad de las aeronaves durante el vuelo; es decir, cuando la aeronave se encuentra en desplazamiento, las corrientes de aire chocan contra sus alas modificando la posición original de la aeronave. En estas situaciones, los diedros proporcionan una mayor estabilidad a la aeronave para tratar de mantenerla en su posición original. Los diedros se encuentran ubicados en cada extremo del ala con cierta inclinación, la cual forma un ángulo respecto a la horizontal. El ángulo formado entre el diedro y la horizontal se le conoce como ángulo de diedro.

Ejes de translación y rotación de la aeronave

Se puede definir como un sistema de coordenadas tridimensionales a través del centro de gravedad con cada eje de este sistema de coordenadas perpendiculares a los otros dos ejes. Por lo tanto, se puede definir la orientación de la aeronave por la cantidad de rotación de las partes de ésta a lo largo de sus ejes principales (ver figura 16).

Eje X

El eje X o Roll axis. Se encuentra a lo largo de la línea central del avión. Al movimiento de rotación que realiza la aeronave sobre el eje X se le llama Roll. Éste es un movimiento ascendente y descendente de las alas del avión causado por el cambio de posición de los alerones. Los alerones son superficies de

control localizadas en la parte trasera de cada ala, las cuales permiten que la aeronave gire.

Eje Y

El eje Y o Pitch axis. Es perpendicular a la línea central del avión y se encuentra en el plano de las alas. Al movimiento de rotación que realiza la aeronave sobre el eje Y se le llama Pitch. El Pitch es causado por el cambio de posición del elevador, localizado en la parte trasera del estabilizador horizontal, ocasionando de esta forma el movimiento hacia arriba y hacia abajo de la nariz de la aeronave.

Eje Z

El eje Z o Yaw axis. Es perpendicular al ala y se encuentra en el plano de la línea central del avión. Al movimiento de rotación que realiza la aeronave sobre el eje Z se le llama Yaw. El Yaw se visualiza como un movimiento de lado a lado de la nariz de la aeronave, el cual es causado por el cambio de posición de la superficie de control localizadas en la parte trasera del estabilizador vertical llamado timón.



Figura 16 Ejes de translación y rotación de un aeroplano

Fuente: [http:// https://www.manualvuelo.es/1pbav/15_supma.html](https://www.manualvuelo.es/1pbav/15_supma.html)

- Alerones (Ailerons) ubicados sobre el eje X (Roll Control).
- Elevador (Elevator) ubicados sobre el eje Y (Pitch Control).
- Timón (Rudder) ubicados sobre el eje Z (Yaw Control).

Principales superficies de control

Las superficies de control son las partes móviles de un avión la cuales sirven para ajustar y controlar la trayectoria de vuelo del mismo (Figura 17). Las superficies de control más utilizadas y comunes son las siguientes:

Los alerones (ailerons) son superficies de control las cuales se localizan en el borde exterior de cada ala. Los alerones siempre se mueven en sentido opuesto; es decir, si el alerón izquierdo baja, el alerón derecho sube para crear fuerzas de igual magnitud, pero de sentidos opuestos (Tercera Ley de Newton); al ocurrir esto, el avión cambiará su trayectoria de vuelo girando sobre su eje X (eje Roll) hacia la derecha o izquierda dependiendo de la posición de los alerones.

El elevador (elevator) es la superficie de control localizada en la parte posterior del estabilizador horizontal, la cual ayuda a la estabilización horizontal del avión. La función del elevador es crear una fuerza en eje Y (eje Pitch) para afectar el ángulo de ataque del avión provocando que esta suba o baje dependiendo de la posición del elevador. Al subir éste, el aire ejerce una fuerza hacia abajo ocasionando que la nariz del avión ascienda y viceversa al descender el elevador el aire ejerce una fuerza hacia arriba provocando que la nariz del avión descienda.

El timón (rudder) es la superficie de control ubicada en la parte trasera del estabilizador vertical, la cual ayuda a la estabilización vertical del avión. La función del timón es generar un movimiento sobre el eje Z (eje Yaw) sin alterar el ángulo de ataque y la altitud del avión.

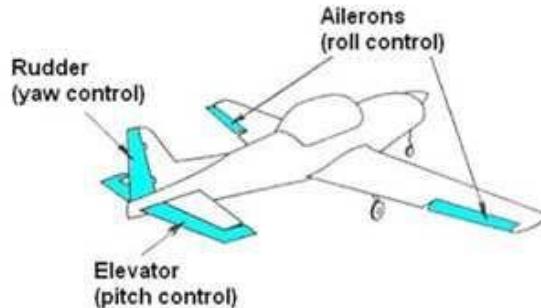


Figura 17 Superficies de control de aeronaves

Fuente: <http://www.takeoffbriefing.com/teoria-de-la-sustentacion-porque-vuela-un-avion/>

2.4.2 Agricultura de precisión

El Concepto sobre el que se basa la agricultura de precisión es aplicar la cantidad correcta de insumos, en el momento adecuado y en el lugar adecuado. Es el uso de la tecnología de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad presente dentro un lote. (Garcia y Flego, 2010, p.100)

Al hablar de índices nos referirnos a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los pixeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena. Un Índice de Vegetación, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda (ver Figura 18), y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal. (Muñoz, 2013, p.2)

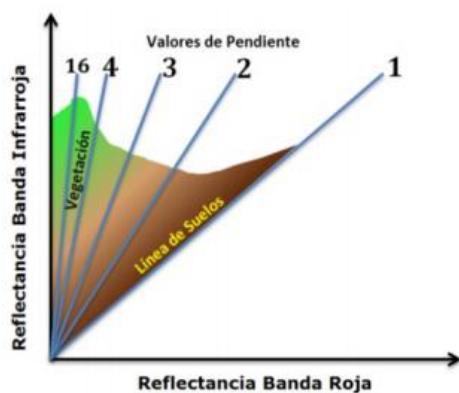


Figura 18 Imagen multibanda

Fuente: Muñoz, P (2013). Índices de vegetación, Ciren.

Estos índices, son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas (ver Figura 19). Los valores bajos de los índices de vegetación usualmente indican vegetación poco vigorosa, mientras que los valores altos, indican vegetación muy vigorosa. Sin embargo, en algunos casos (como los índices RVI y NRVI) el valor del índice de vegetación es inversamente proporcional a la cantidad de vegetación presente en el área, por lo que se recomienda documentarse sobre este punto, al momento de interpretar alguno de ellos. (Muñoz, 2013, p.3)

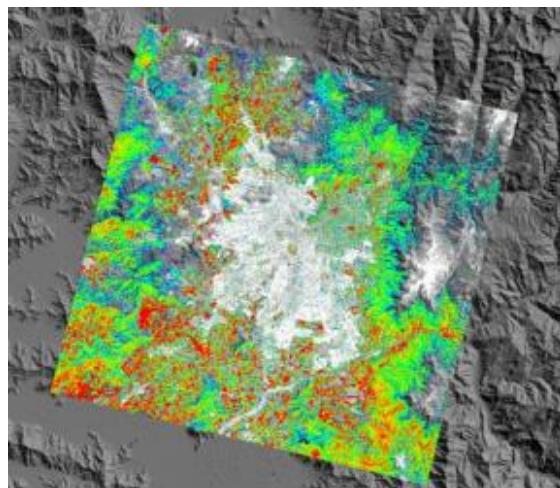


Figura 19 Reflectancia de terreno

Fuente: Muñoz, P (2013). Índices de vegetación, Ciren

Estos, usan el cociente de la reflectancia de una banda con otra, (usualmente rojo e IR cercano, debido al alto contraste o diferencia en la reflectancia, que presenta la clorofila1 en ambas bandas). El término ‘basado en la pendiente’ se refiere a que, al analizar los valores resultantes del índice de vegetación, se comparan esencialmente las pendientes de las líneas que pasan a través del origen y de los pixeles representados en un gráfico, con la reflectancia de una banda en el eje de las X y la reflectancia de la otra en el eje Y.

2.4.2.1 Proceso manual de estudio de plantaciones

Para el proceso de estudio de índices en una plantación, se utiliza el muestreo de evaluadores de campo (ver figura 20), que utilizan una cartilla para anotar las observaciones en las zonas estudiadas. El estudio no se hace en toda la extensión de terreno este estudio se hacen al azar haciendo patrones de recorrido en zig zag o espirales.



Figura 20 Jornaleros

Fuente: <http://evaluacionydesarrollo.com/2-el-papel-del-evaluador-en-la-evaluacion-participativa/>

La función del jornalero o evaluador de campo es transmitir la información del estado de la plantación para que este lo adjunte en un Excel y de acuerdo con ello se toman las decisiones para utilizar fertilizantes o pesticidas de acuerdo con la problemática que se haya encontrado. Haciendo aproximaciones se utiliza alrededor de 10-12 personas por cada 10 ha. (Frangi, 2015, p.15)

2.4.3. NDVI

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado, es el más conocido de todos, y es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes.



Figura 21 Reflectancia de una banda 2

Fuente: Muñoz, P (2013). Índices de vegetación, Ciren.

- Valores muy bajos de NDVI, del orden de 0.1, corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas.
- Valores de 0.2 a 0.3 pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales (ver Tabla 3)

Tabla 3 Valores de NDVI para esparragos

Valores NDVI	Estado de vegetación
0.6 a 1	vegetación Optima
0.35 a 0.6	Vegetación Regular
0.15 a 0.35	Suelo enfermo
0.15 a 0	suelo desnudo
0 a -1	Valores que no indican nada

Fuente: Muñoz, P (2013). Índices de vegetación, Ciren.

A partir de estos valores tendremos los niveles correspondientes a praderas, cultivos, forestaciones etc. dependiendo el valor alcanzado. (Muñoz, 2013, p.4)

Minimiza efectos topográficos y produce escala lineal de medición. La escala va de – 1 a 1 con el valor cero representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación. La normalización que realiza, reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos. (Muñoz, 2013, p.3)

2.4.4. XFLR5

Es un software de diseño orientado al diseño de aeronaves de todo tipo y forma. Este software nos permite diseñar el perfil alar, el fuselaje, alerones, entre otras partes de una aeronave. Adicionalmente nos permite hacer las simulaciones, como se ve en la figura 22, de esfuerzo mecánico de la aeronave y pruebas de estabilidad. La historia de software proviene del desarrollo original de otro software llamado Xfoil, este se adaptó a un interfaz más amigable y de licencia publica para el uso de cualquier persona. El software cuenta con 5 diferentes aplicaciones: Análisis de estabilidad y control, Análisis 3d, Diseño de perfiles, Análisis de perfiles y el modo de diseño.

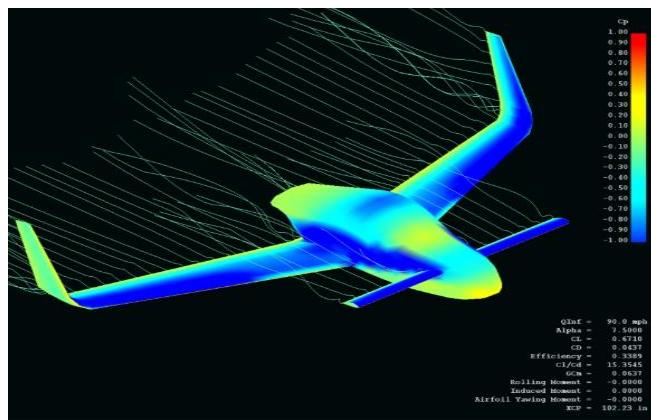


Figura 22 Simulación en software XFLR5

Fuente http://www.apolloanard.com/6_xflr5.htm

XFLR5 entrega las mismas opciones para la modificación de perfiles, que entrega el original. Estas son: Refinamientos locales y globales, Modificación de espesor, máximo espesor, curvatura y posición de máxima curvatura. La modificación de estos parámetros causará la generación de un nuevo perfil. Cuando un perfil modificado es borrado o sobrescrito, todos los resultados asociados se pierden, de manera de asegurar la consistencia. La experiencia muestra que, el afinamiento de los paneles de un perfil, después que este ha sido cargado o modificado, es usualmente una medida prudente de tomar antes de realizar un análisis (Navas, 2011, p.32).

CAPITULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL DRONE DE ALA FIJA

En el presente capitulo se describe el diseño e implementación del drone de ala fija para estudio de índices de vegetación en agricultura de precisión en el Fundo Altamirano ICA.

3.1. Condiciones iniciales

El drone de ala fija cumple con la finalidad de desarrollar de manera exitosa las actividades planteadas en la presente tesis con las siguientes características funcionales:

Sistema Mecánico:

- Vehículo aéreo del tipo ala fija, de fácil ensamblaje.
- El drone debe tener una envergadura adecuada para ser de fácil portabilidad.
- Capacidad de carga debe ser de por lo menos de la totalidad del peso de los componentes necesarios para que puedan cumplir las tareas propuestas.
- El material por usar en la estructura del drone debe ser muy liviana y resistente a los golpes y fricciones. Además, que para su modelado debe ser un material fácil de manipular.
- El drone de ala fija debe tener una resistencia a vientos que se registran en el fundo Altamirano, Ica.

Sistema Eléctrico:

- El drone de ala fija debe tener una autonomía de vuelo de 10 min dependiendo de las condiciones climatológicas, garantizando así una cobertura variable de terreno de 20 hectáreas como mínimo.
- El drone debe ser propulsado por un motor eléctrico que este dimensionado para la aplicación.

Sistema Electrónico:

- El drone de ala fija almacena una ruta programada del terreno antes de iniciar el vuelo.
- El drone cumple con la función de obtener imágenes georreferenciadas.
- El drone tiene una altura máxima de operación de 60 metros.

3.2. Diseño mecánico

Para que este sistema haya sido realizado y desarrollado correctamente, es fundamental que la presente tesis cumpla con todas las tareas para las cuales fue diseñado y programado. A continuación, se describe el diseño e implementación del drone de ala fija:

- a) Selección de material del drone
- b) Diseño del drone
- c) Pruebas de esfuerzo

3.2.1. Selección de material del drone:

A continuación, en la tabla N°4, se presenta un cuadro comparativo de las propiedades físicas de los materiales que se utilizan para el diseño de UAVs.

Tabla 4 Comparación entre materiales para fuselaje

Material	Madera Balsa	fibra de carbono	Epoxica	Espuma de poliestireno
Densidad	0.15 g/cm3	1,6 g/cm3	1.4 g/cm3	0.016 g/cm3
Modulo elasticidad	26800 Mpa	230000 Mpa	3400 Mpa	2900 Mpa
Dureza	Baja	Alta	Media	Media

Fuente: elaboración propia

Habiendo hecho un análisis de las propiedades de cada material y tomando en cuenta la viabilidad para el proyecto se decidió optar por el material Espuma de poliestireno.

3.2.2 Diseño del Drone

Al diseño se le asignaron las medidas de largo, ancho, offset del perfil interno y perfil externo del ala. Estas medidas se asignaron de acuerdo con el criterio que consideramos para que el drone sea de fácil portabilidad y basándonos en los modelos comerciales existentes, como se puede ver en la tabla 5.

Tabla 5 Comparativa de modelos comerciales

Características	Modelo	
	Parrot Disco	Ebee
Fuselaje	1150 mm	960 mm
Peso	750 g	690 g
Tipo de batería	LiPo	LiPo
Tipo de motor	Brushless	Brushless
Velocidad de crucero	80 Km/h	90 km/h

Fuente: elaboración propia

Para el diseño del drone de ala fija realizamos el diseño en 3 partes: Diseño del ala, diseño del fuselaje y diseño de soportes.

3.2.2.1 Diseño del ala

Seleccionamos el perfil alar que tendrá el drone de ala fija. En este caso utilizaremos el NACA 6412 debido a que es el perfil alar que se utiliza para drones de ala fija. Extraemos el modelo del perfil alar, como se muestra en la figura 23, de la base de datos de la University de Illinois Urbana-Champaign y lo exportamos al programa, dandonos una vista previa en 2D del perfil alar.

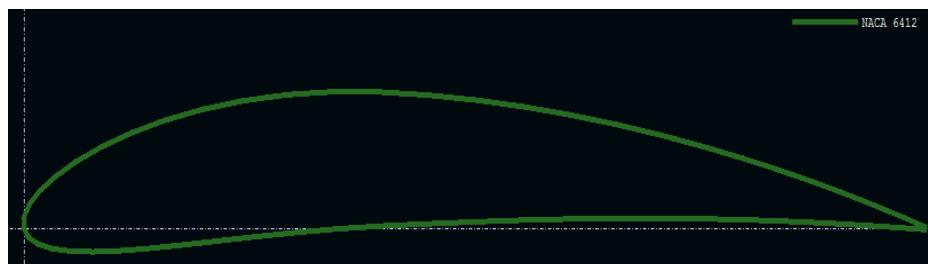


Figura 23 Perfil aerodinámico creado con el software XFLR5

Fuente Elaboración propia

Se procede a seleccionar la herramienta de diseño de ala en el programa, tal como se muestra en la figura 24.

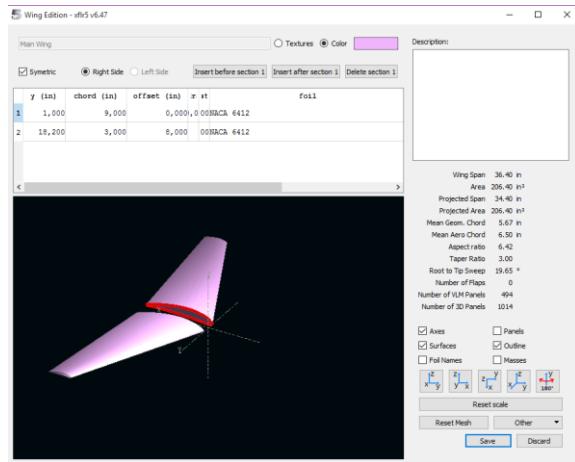


Figura 24 Diseño de ala en el software XFLR5

Fuente Elaboración propia

Se ingresaron las medidas al software para generar el ala del dron, como se muestra en la figura 25:

	y (in)	chord (in)	offset (in)	rst
1	1,000	9,000	0,000	0 00NACA 6412
2	18,200	3,000	8,000	00NACA 6412

Figura 25 Datos ingresados para el diseño

Fuente Elaboración propia

Con estos datos se generó el siguiente modelo 3D (figura 26):

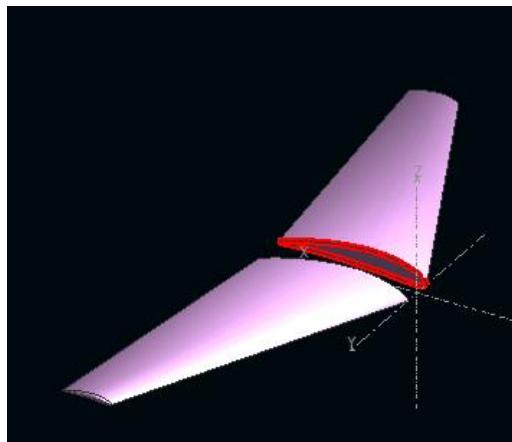


Figura 26 Modelo 3D de ala

Fuente Elaboración propia

3.2.2.2 Diseño del Fuselaje

Ingresamos a la pestaña del software en la cual nos permite diseñar el fuselaje de acuerdo con nuestra necesidad, teniendo en cuenta el tamaño óptimo para almacenar los materiales que usaremos; se utilizó un fuselaje de 54cm de largo y un radio de 6 cm en sus 6 capas como se muestra en la figura 27.

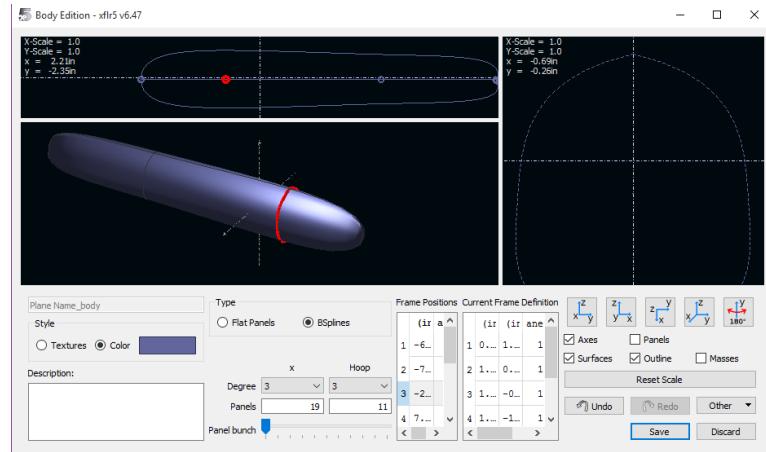


Figura 27 Entorno grafico de diseño de fuselaje

Fuente: Elaboración propia

A continuación (figura 28), se muestra el modelo final generado por el software:

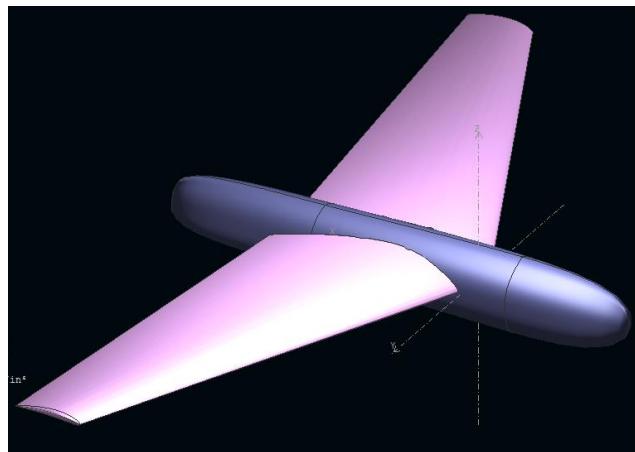


Figura 28: Modelo 3D Final

Fuente Elaboración propia

3.2.2.3 Diseño de soportes

Para la correcta ubicación de los componentes dentro del drone como la cámara, el controlador de vuelo, el variador de velocidad, entre otros, se diseñó una pieza en la cual se acoplarán los diversos componentes mediante correas velcro y de acuerdo con el diseño de fuselaje se le

asignaron las medidas para que esta pueda colocarse en el interior, como se muestra en la figura 29.

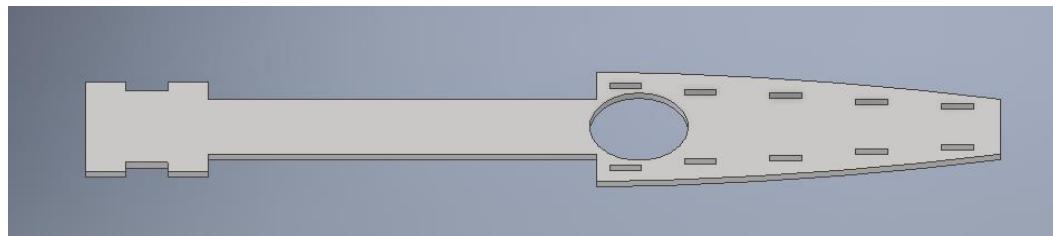


Figura 29: Modelo 3D de soporte de cámara

Fuente Elaboración propia

Adicionalmente se diseñó un soporte para ubicar y fijar el motor (figura 30) que propulsara al drone, el cual se ubica en el interior del fuselaje.

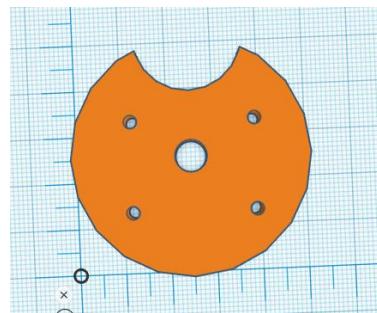


Figura 30: Modelo 3D de soporte de motor

Fuente Elaboración propia

Para acoplar las alas con el fuselaje se diseñó 2 acoples para ajustar mediante pernos por ambos lados del ala. A continuación, se muestran los dos acoples en las figuras 31 y 32:

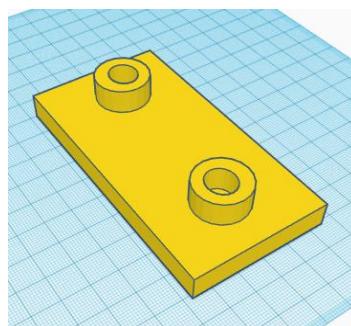


Figura 31 Modelo 3D de acople Superior

Fuente Elaboración propia

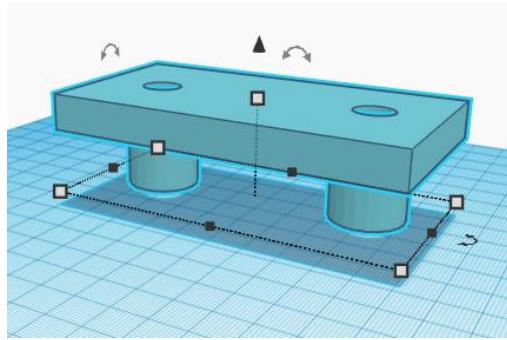


Figura 32 Modelo 3D de Acople inferior

Fuente Elaboración propia

3.2.3 Pruebas de esfuerzo

Teniendo el modelo final del drone, realizamos el análisis del esfuerzo aerodinámico que soportara el drone en diversas velocidades en este caso 100 km/h (figura 33) y 35 km/h (figura 34). Los parámetros con los que se hicieron los cálculos esfuerzos aerodinámicos se muestran en las siguientes imágenes.

Object	Field	Value	Unit
Polar Name	Name	T2-VLM1-1.5lb-x0.0in-lr	
Polar Type	Type	FIXEDLIFTPOLAR	
	Velocity	62,000	mph
	Alpha	0	°
	Beta	0	°
Analysis Type	Method	VLMMETHOD	
	Boundary condition	DIRICHLET	
	Viscous	false	
	Tilted geometry	false	
	Ignore body panels	true	
Inertia	Use plane inertia	false	
	Mass	1,500	lb
Center of Gravity	x	0	in
	z	0	in
Inertia tensor			
Reference Dimensions			
Environment data			
Air data	Density	1,225	kg/m ³
	Viscosity	1,5e-05	m ² /s
Ground height c	Ground effect	false	
	Height flight	3,937,0	in

Figura 33 Parámetros de Simulación 100km/h

Fuente Elaboración propia

Object	Field	Value	Unit
Polar Name	Name	T2-VLM1-50.0lb-x0.0in-	
▼ Polar Type	Type	FIXEDLIFTPOLAR	
	Velocity	22,352	mph
	Alpha	0	°
	Beta	0	°
▼ Analysis Type	Method	VLMMETHOD	
	Boundary condition	DIRICHLET	
	Viscous	false	
	Tilted geometry	false	
	Ignore body panels	true	
▼ Inertia	Use plane inertia	false	
	Mass	50,000	lb
> Center of Gravity			
> Inertia tensor			
▼ Reference Dimensions	Reference dimensions	MANUALREFDIM	
	Reference Area	206,40	in ²
	Reference Span Length	36,400	in
	Reference Chord Length	6,500	in
▼ Environment data			
▼ Air data	Density	1,225	kg/m ³
▼ Ground height c	Viscosity	1,5e-05	m ² /s
> Stability Controls	Ground effect	false	
	Height flight	0	in

Figura 34 Parámetros de Simulación 35km/h

Fuente Elaboración propia

A continuación, en la figura 35 se muestra el modelo en 3D con el cálculo de esfuerzos que se generaron en el drone a una velocidad de 35 km/h y un peso de 0.7 kg.

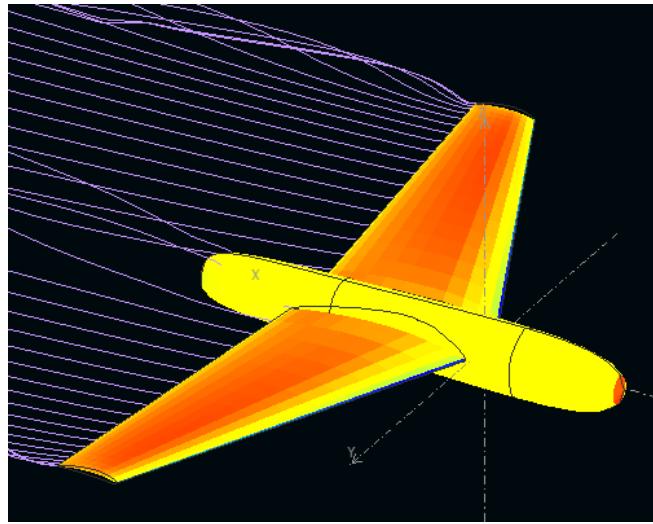


Figura 35 Cálculo de esfuerzos a 35Km/h

Fuente Elaboración propia

Adicionalmente el Software simula las corrientes de viento, las fuerzas en el drone y la interacción de las mismas, como se muestra en la figura 36.

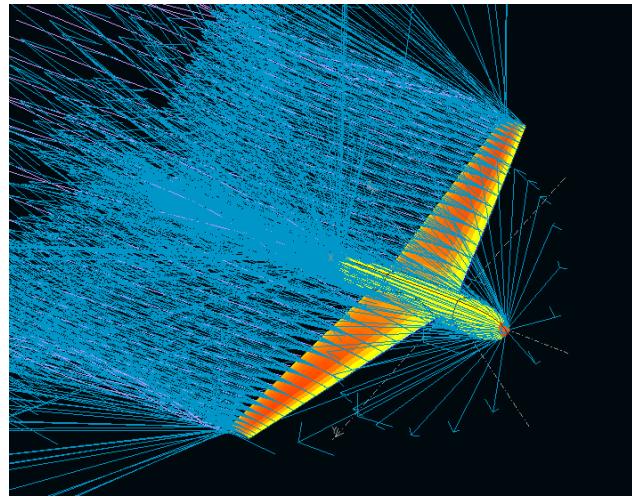


Figura 36 Simulación de corrientes de viento a 35Km/h

Fuente Elaboración propia

En la figura 37, se muestra el modelo en 3d con el cálculo de esfuerzos que se generan en el drone a una velocidad de 100 km/h y un peso de 0.7 kg.

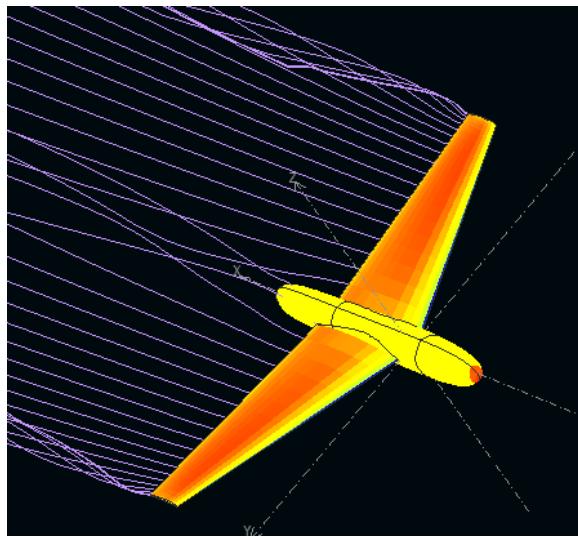


Figura 37 Cálculo de esfuerzos a 100Km/h

Fuente Elaboración propia

Así mismo, para 100Km/h se realizó la simulación de corrientes de viento, las fuerzas en el drone y la interacción de las mismas, como se muestra en la figura 38.

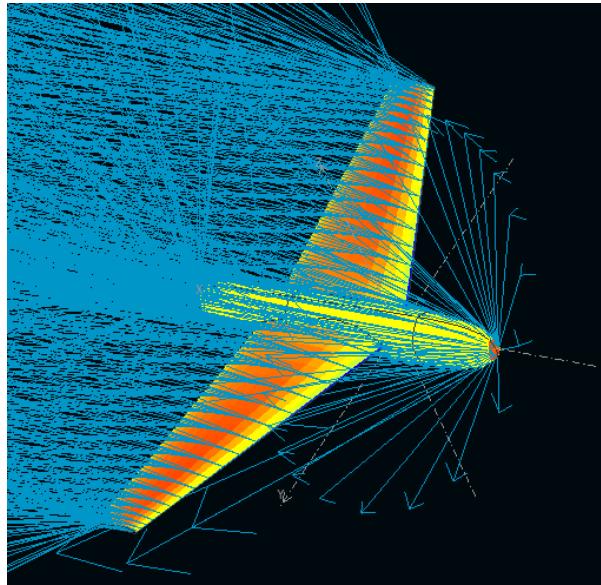


Figura 38 Simulación de corrientes de viento a 100 Km/h

Fuente Elaboración propia

Teniendo las simulaciones se obtiene el siguiente grafico (ver figura 39) que nos indica que con la configuración de perfil alar y dimensiones seleccionadas se tendrá una estabilidad en el vuelo y también determina en que parte del drone se aplica el mayor esfuerzo mecánico.

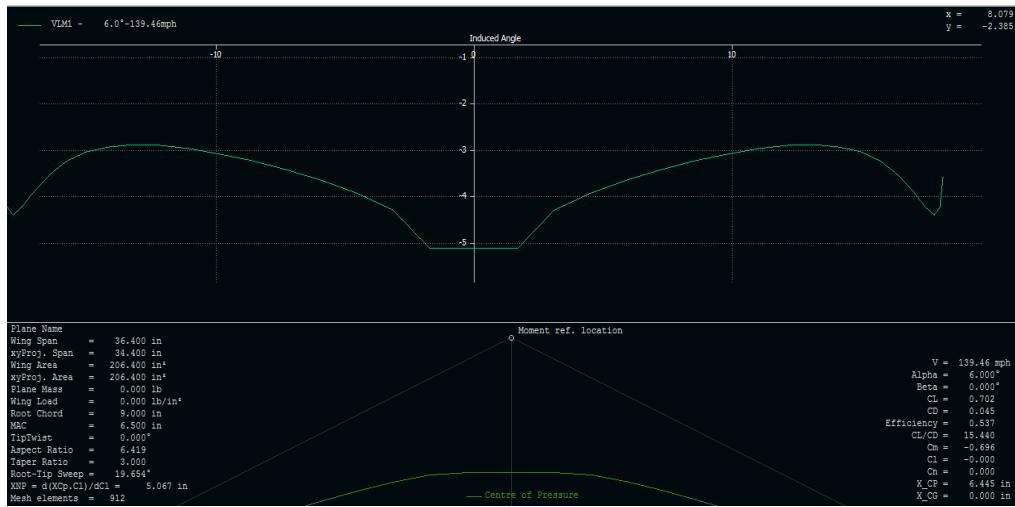


Figura 39 Grafico de resultados

Fuente Elaboración propia

3.3. Diseño Eléctrico

En esta sección se explican cuáles fueron las consideraciones tomadas para el drone de ala fija que se usarán para el desarrollo de la presente tesis.

- a) Cálculo de autonomía de vuelo requerida
- b) Selección de motor
- c) Selección de batería

3.3.1. Cálculo de autonomía de vuelo requerida

El drone de ala fija debe realizar un vuelo autónomo siguiendo un plan de vuelo del tipo cuadricula como se puede ver en la figura 40, esto garantiza la obtención de la data necesaria para su post proceso. Así mismo, se tiene en cuenta que la extensión de terreno a analizar es de 20 Ha. Además, se prevén sistemas de control de energía y protección para evitar poner en riesgo la misión por niveles bajos del mismo.



Figura 40 Plan de vuelo tipo cuadricula

Fuente: <https://www.agriexpo.online/es/prod/sensefly/product-170212-28853.html>

Tomando en cuenta el desplazamiento total en metros (ver figura 41), la velocidad de desplazamiento del ala fija y el tiempo de retorno se pudo calcular el tiempo mínimo de autonomía que requiere el diseño. A continuación, se muestran los cálculos para el tipo de vuelo descrito para un terreno de 200 metros de largo por 200 metros de ancho.

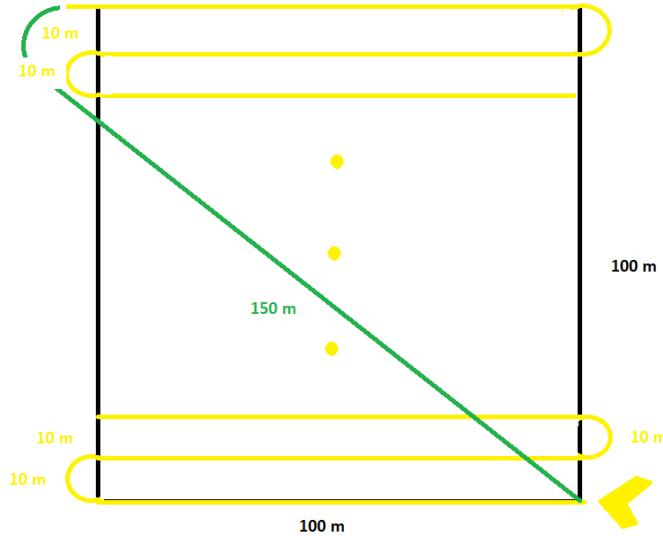


Figura 41 Descripción del desplazamiento del dron

Fuente: Elaboración propia

- Tramos horizontales de 200 metros c/u= 21
- Tramos curvos para giro del dron de 16 m c/u = 20
- Tramos curvos para retorno diagonal de 25 m c/u = 1
- Tramo de retorno diagonal de 285 m c/u = 1
- Tramo horizontal para aterrizaje 10 m c/u =1

Con los datos se obtiene la siguiente tabla 6:

Tabla 6 Desplazamiento de dron

Descripción	Metros	Cantidad	Sub Total (m)
Tramo horizontal de 200m	200	21	4200
Tramos curvos para giro del dron	16	20	320
Tramo curvo para retorno diagonal	25	1	25
Tramo de retorno diagonal	285	1	285
Tramo de aterrizaje	10	1	10
Total			4840

Fuente: Elaboración propia

Se obtiene que para un terreno de 20 Ha los metros totales a recorrer por el dron de ala fija son 4840, con esto se puede obtener el tiempo de vuelo con la siguiente formula:

$$Tiempo\ de\ vuelo = \frac{Metros\ totales}{Velocidad\ del\ drone * 60}$$

Entonces para una velocidad de 10 m/s:

$$Tiempo\ de\ vuelo = 4840 / (10*60) = 8.06\ min$$

En base a los cálculos anteriores se concluye que el drone se debió diseñar para un tiempo de vuelo mínimo de 8.06 minutos.

3.3.2. Selección del motor

Para realizar la elección del motor que permita la sustentación del drone sin complicaciones además de no sobre calentarse durante el tiempo de la misión, se planteó un factor de seguridad empuje/peso de 1 al 80% de la potencia máxima del motor, el cual tiene como finalidad permitir que el drone levante con facilidad su peso en condiciones de carga completa.

Así mismo, se tomaron en cuenta los datos de peso del drone de ala fija, como se puede ver en la tabla 7:

Tabla 7 Pesos del drone de ala fija

Descripción	Peso (g)
Fuselaje	295
Controlador de velocidad	30
Controlador de vuelo	30
Hélice	5
Receptor	7
Cámara	149
Batería	179
Motor brushless	55
Total	750

Fuente: Elaboración propia

- Peso total del drone = 750 g,
- Relación de empuje peso (factor de seguridad) = 1
- Peso total estimado que el drone debería poder levantar (Relación Empuje / Peso) = $0.75*1 = 0.75\ Kg$,

En base a estos datos se hizo la elección del motor tomando en cuenta el criterio principal de empuje, peso y potencia. A continuación, la tabla 8, registra las características técnicas de dos motores.

Tabla 8 Comparativa de motores Brushless

Marca	Modelo	Voltaje (V)	Helice	Corriente (A)	Empuje (g)	Potencia (W)	Peso (g)
Race Star	BR2212 2200KV	11.1	6030	21.5	732	239	53
SunnySky	A2212 2450KV	11.1	6040	22	790	244.2	55

:

Elaboración propia

Se eligió el motor de la marca SunnySky pues a un voltaje de 11.1 V, con una corriente de operación de 25.5 A se tiene un empuje de 790 gr que asegura el levantamiento del drone de ala fija de 750 gr de peso.

En la figura 42 se muestra el diseño 3D del motor brushless.

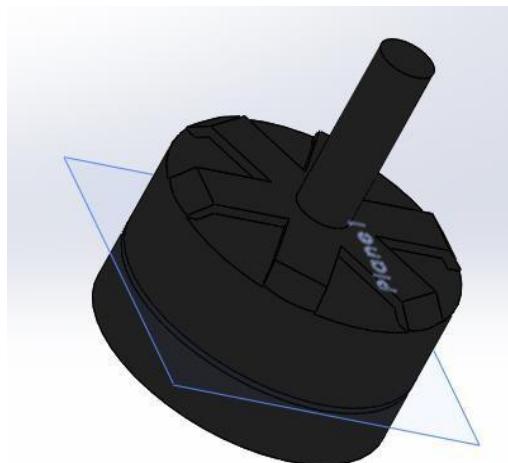


Figura 42 Diseño del motor en 3D

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Selección de hélice

Al momento de elegir una hélice es importante encontrar el punto de equilibrio entre tamaño y grado de inclinación, para esto se revisó la ficha técnica del motor, en donde se recomienda la hélice para su correcto funcionamiento. En esta tesis se usó la hélice GEMFAN 6 x 4, es decir 6 pulgadas de longitud entre extremos y 4 pulgadas de paso. En la figura 43 se muestra las hélices usadas en el drone de ala fija.



Figura 43 Helice GEMFAN 6 x 4

Fuente: Elaboración propia

Selección de batería

Para la selección de la batería se tuvo en cuenta la composición de las mismas, el peso, características del motor y la autonomía de vuelo calculada anteriormente.

En los equipos de radio control se utilizan 4 tipos de baterías, Níquel Cadmio (NiCD), Níquel Metal Hidruro (NiMH), Iones de Litio (IonLitio) y Polímero de Litio (LiPo). En la tabla 9 se muestran las características más importantes de estas baterías.

Tabla 9 Comparación de tipos de baterías

Tipo	Tension por celda (V)	Duración (número de recargas)	Tiempo de carga (H)	Auto descarga por mes (% del Total)
Ni-Cd	1.25	500	10h-14h	30%
Ni-Mh	1.25	1000	2h-4h	20%
Li-ion	3.16	4000	2h-4h	255
Li-Po	3.7	5000	1h-1.5h	10%

Fuente: Elaboración propia

En base a estas características se eligió para la presente tesis el uso de baterías del tipo LiPo, así mismo se requiere de una tensión de 11.1 V por lo que con 3 celdas de este tipo

de baterías se obtiene el valor requerido. Existen baterías de 3 celdas con diferentes capacidades de almacenamiento (mAh), a continuación, en la tabla 10 se presentan 2 modelos para este tipo de baterías.

Tabla 10 Comparativa de modelos de baterías

Marca	Celdas (S)	Voltaje (V)	Capacidad de Almacenamiento (mAh)	Peso (g)
China hobby Line	3	11.1	2200	179
Dupu	3	11.1	3300	270

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se debe tener en cuenta la potencia consumida por el motor, el cual es el consumo principal; el resto de componentes tienen un consumo mínimo en comparación con el del motor por lo que no se considera para los cálculos.

Los cálculos son los siguientes:

- Consumo del motor a máxima potencia: $11.1 \text{ V} * 22 \text{ A} = 244.2 \text{ W}$
- Tiempo de vuelo a máxima potencia: $2200 \text{ mAh} / 244.2 \text{ W} = 9.01 \text{ min}$

Teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento y el peso se seleccionó la batería de la marca China Hobby Line que tiene capacidad de 2200 mAh y un peso de 179 gramos por lo que no afecta a la sustentación del drone de ala fija; así mismo, esta batería nos asegura el recorrido de 20 Ha calculado en 8.06 minutos.

3.4. Diseño Electrónico

- a) Elección del controlador de vuelo
- b) Componentes seleccionados para el sistema de vuelo
- c) Selección del equipo de adquisición de datos

3.4.1. Elección de sistema de control de vuelo

El controlador de vuelo es fundamental en el drone de ala fija, pues tiene la función de integrar todos los componentes y controlarlos, para así conseguir el movimiento deseado siguiendo las instrucciones de la ruta del vuelo pre programado. Este controlador incorpora un conjunto de sensores denominados unidad de medición inercial (IMU), el cual mide e indica la orientación y velocidad del drone.

En la tabla 11 se exponen 3 modelos de controladores de vuelo y sus características más resaltantes:

Tabla 11 Características de controladores de vuelo

Controlador de Vuelo	Software Open Source	Componentes adicionales	Disponibilidad en el mercado	Precio (S.)
Dji Naza V2	No	Si	No	450
PixHawk 2.4.8	Si	Si	No	270
ArduPilotMega 2.8	Si	No	Si	180

Fuente: Elaboración propia

Después de analizar las características de cada controlador de vuelo, se seleccionó para la presente tesis el modelo ArduPilotMega 2.8 debido a que es un controlador compacto que no necesita de componentes adicionales para su funcionamiento, así mismo al utilizar un software Open Source nos permite realizar modificaciones al programa. Se descartaron las controladoras PixHawk y DJI Naza por su alto costo y en el caso del PixHawk porque requiere de componentes adicionales lo que significa un peso extra que afectaría a la estabilidad del drone de ala fija.

3.4.2. Componentes seleccionados para el sistema de vuelo

3.4.2.1. Módulo de poder

Anteriormente se seleccionó la batería de la marca China Hobby Line que tiene capacidad de 2200 mAh la cual nos asegura 9 minutos de vuelo para cumplir la misión pre programada. Para que la batería alimente el controlador y todo el sistema electrónico, se usó un módulo de poder (ver figura 44); así mismo, este módulo de poder posee un

sistema electrónico que permite medir datos de voltaje y corriente de la batería los cuales serán enviados a través del módulo de telemetría.



Figura 44 Módulo de poder

Fuente: <https://www.rcdrone.cl/producto/modulo-de-poder-arduflyerapm-pixhawk-multiwii-7s/>

3.4.2.2. Recetor – Transmisor

Este dispositivo nos sirve para controlar el drone de forma inalámbrica, las señales y órdenes son recibidos por el receptor (Rx) que se conecta a la controladora de vuelo. Si bien el drone será autónomo, pues tendrá una ruta preprogramada, tiene estos componentes para alguna maniobra externa que se pudiera presentar durante el vuelo, como por ejemplo fuertes vientos y tengamos que hacer el retorno del equipo de manera manual.

En este trabajo se escogió el transmisor de la marca FlySky modelo i6 el cual cuenta con las siguientes características, como se puede ver en la tabla 12:

Tabla 12 Características de Receptor FlySky i6

Modelo	Nº Canales	Rango de frecuencia	Peso de Transmisor	Peso del receptor
FlySky i6	6	2.4 GHz	392 g	14.9 g

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.3. Micro servos

Los micro servos son motores eléctricos encargados de realizar el movimiento de los alerones. Este motor se conecta al receptor (Rx) seleccionado anteriormente que a su vez se conecta con el transmisor de radiocontrol, con el cual obtenemos el control del drone.

En esta tesis se usaron los micros servos de 9g de la marca Turnigy que tiene las características mostradas en la tabla 13.

Tabla 13 Características de micro servos

Modelo	Voltaje de Operación	Velocidad	Torque reposo	Peso
Turnigy TG9e	3 V	0.1 s / 60 grados	1.3 Kg	9 g

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.4. Variadores de Velocidad

El variador de velocidad o conocido también como ESC (controlador de velocidad electrónico) por sus siglas en inglés, nos permite controlar la velocidad de giro del motor debido a la señal PWM (modulación por ancho de pulso) que recibe del receptor y controlador.

Para esta tesis se seleccionó los variadores FMT 30 A el cual suministra una corriente de 30 A, la cual es superior a la corriente exigida por el motor (22 A) con lo cual tenemos la certeza de que el motor no sufrirá una sobrecarga durante el vuelo. En la tabla 14 se muestran las características del regulador seleccionado:

Tabla 14 Características del ESC

Características	Unidades
Corriente máxima	30 A
Corriente límite	40 A
BEC	5V, 2A
Dimensiones	45 x 24 x 11 mm
Peso	25 gr

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.5.GPS

El sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) sirve para georreferenciar el drone, es decir este dispositivo nos permite conocer los datos de ubicación, velocidad y latitud del drone de ala fija. Este dispositivo en conjunto con el controlador de vuelo, aseguran que el drone cumpla con la ruta de vuelo pre programada.

En esta tesis se escogió el M8N GPS (ver Figura 45) por sus características como dimensiones y peso que no afectan la sustentación del drone de ala fija.



Figura 45 M8N GPS

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Selección del equipo de adquisición de datos

Para que el drone de ala fija pueda conseguir la información necesaria para analizar el índice de vegetación normalizada, es indispensable que cuente con un equipo que permita adquirir dichos datos. Este equipo es una cámara digital la cual capta las imágenes para luego ser post procesadas mediante un software.

Se utilizó la cámara Sony Exmor R IMX 117 12 MP 3 de la marca Sony, por ser la cámara que adquirió la empresa para realizar los estudios, dicha cámara presenta las características indicadas en la tabla 15:

Tabla 15 Características de cámara digital

Especificación	Descripción
Resolución	12 MegaPixel
Sensor	Sony Exmor R IMX 117 12 MP
Intervalo de foto	1.5 s /JPG
GPS	Ublox Neo-M8N
Batería	1200mAh
Dimensiones	60 x 41 x 25 mm
Peso	49.8 gr

Fuente: Elaboración propia

3.5. Diseño Informático

El diseño informático se hizo en 3 etapas la selección el software de control, procedimiento de programación de software y programación de rutas de vuelo

3.5.1. Selección de software de control

Se optó por utilizar el software Mission Planner por permitir grabar los mapas para la utilización sin conexión a internet e incorporar la función de grabación en vivo de los datos telemétricos, además este software es de código abierto, lo que permitirá adaptarse a las necesidades del presente proyecto de tesis. En la tabla 16 podemos ver un comparativo de las características de algunos programas, que podrían haber cumplido con el propósito.

Tabla 16 Comparativo de software de control

	Mission Planner	MultiWiiCopter	Open Pilot
Integración con Google maps	✓	✓	✓
Permite calibración	✓	✓	✓
Control manual	✓	X	✓
Permite programar misiones	✓	✓	✓
Permite grabar mapas sin conexión a internet	✓	X	X
Software de código abierto	✓	X	✓

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Procedimiento de programación de software

3.5.2.1 Instalación de firmware

Se abrió el programa, se conectó la tarjeta a uno de los puertos USB del PC y se procedió a la pestaña de install setup, luego a install firmware, y seleccionamos el tipo de vehículo que vamos a utilizar, para este caso es un drone de ala fija o Arduplane. De esta forma cargamos el software a la tarjeta, y ella reconoce que tipo de vehículo va a manejar. Como se ve en la figura 46, presentada a continuación.

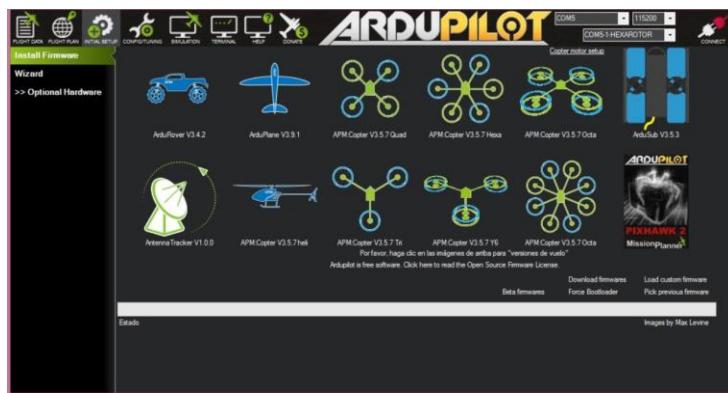


Figura 46 Interfaz Mission Planner

Fuente: Elaboración propia

Para este caso se escoge el modelo de configuración “Plane” como en la figura 47; de esta manera la tarjeta asimilara la disposición del motor y los micro servos.

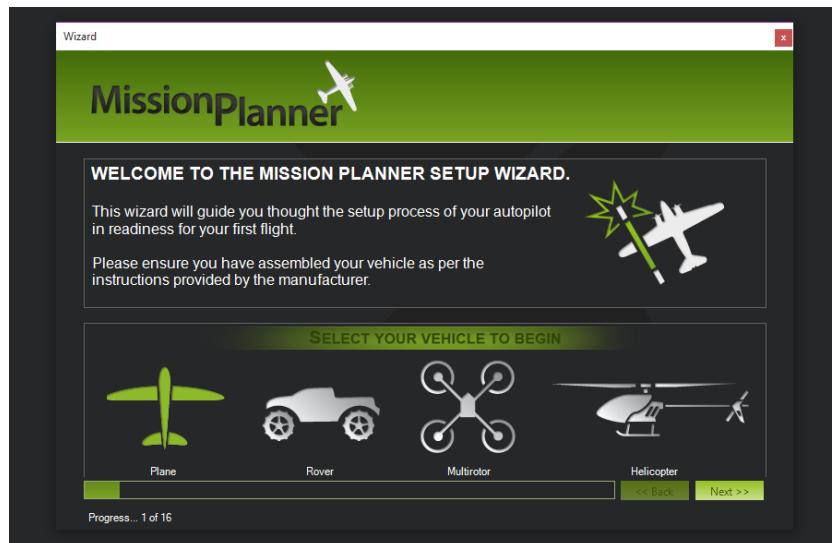


Figura 47 Instalación de firmware

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2 Configuración del compás

Para configurar el compás, fue necesario girar el drone sobre todos sus ejes (X, Y, Z) de forma circular, así obteniendo el mayor número de puntos que se irán mostrando en la pantalla del PC. Al llegar a un número de puntos determinado automáticamente el programa dio como finalizada la calibración del compás magnético, esto se observa en la figura 48.

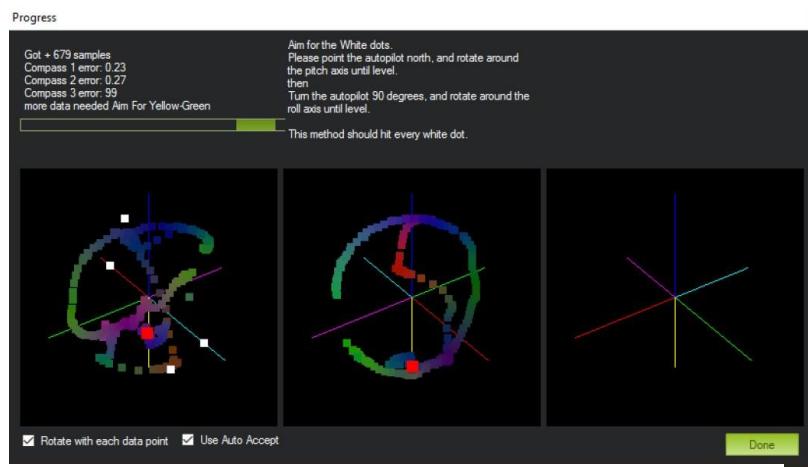


Figura 48 Calibración de compás

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.3 Calibración Acelerómetros y Nivel

El programa fue mostrando en que posiciones se debe poner el Drone de ala fija para calibrar el acelerómetro (ver figura 49), por cada posición que pide el programa se debe dar OK, para guardar ese parámetro en el controlador.



Figura 49 Configuración de acelerómetros

Fuente: Elaboración propia

La segunda configuración es la de nivel, como se muestra en la figura 50, en la que el Drone debe estar en una superficie lo más nivelada posible, para tenerla como referencia, ya que esta será la que el conservará en el aire.



Figura 50 Configuración de nivel

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.4 Modos de vuelo

Luego el programa pidió configurar los canales auxiliares, para este caso se configuró en el canal 5, un switch de 2 posiciones, 2 modos de vuelo. Los modos de vuelo se definen como la forma en que el Drone se va a comportar cuando este en el aire, los modos de vuelo son 2, estabilizar (Stabilize) y mantener altitud (Alt Hold).

En el primero estabilizar (Stabilize), en este modo la tarjeta nos ayuda en vuelo con los acelerómetros y los giróscopos a mantener siempre el horizonte en el Drone después de tener un movimiento, auto corrige. En el segundo modo es mantener altitud (Alt Hold), en este modo la tarjeta toma de referencia por medio del barómetro la presión atmosférica a la cual fue activada este modo, en este modo se desactiva el acelerador en el mando y se vuelve autónoma la altitud, revisar la figura 51.



Figura 51 Modos de vuelo

Fuente: Elaboración propia

3.6. Implementación mecánica

Para la elaboración del ala del drone del ala fija se tomó en cuenta el perfil seleccionado el NACA6412, se hizo un corte laser de los perfiles con las medidas en las que se diseñó en el software XFLR5, como se muestra en la figura 52.



Figura 52 Corte laser de perfiles NACA 6412

Fuente Elaboración propia

Se procedió a elaborar el ala utilizando un bloque de espuma de poliestireno y pegando los perfiles en ambos extremos como se puede ver en la figura 53.



Figura 53 Fabricación de ala

Fuente Elaboración propia

Para formar ala se utiliza el método de corte por hilo caliente, en el cual mediante un alambre de nicrom electrificado se elimina el excedente de material (ver figura 54), cortando el bloque de la forma en la que se diseñó el ala.



Figura 54 Corte por hilo caliente

Fuente Elaboración propia

Después se procede a lijar el ala y a realizar el agujero donde irán alojados los micro servos que moverán los alerones, como se puede ver en la figura 55.



Figura 55 Fabricación de agujero para microservo

Fuente Elaboración propia

Seguidamente se armó el fuselaje del drone (se usó el Sonicmodell HD Wing) para ello se utilizó goma UHU POR, pegamento especial para poli estireno, para cerrar el fuselaje. Antes de ello se utilizó el soporte del motor y se acoplo a la misma (ver figura 56) para ser colocado antes de armar el fuselaje como se puede ver a continuación:



Figura 56 Ensamble de fuselaje

Fuente Elaboración propia

Una vez armado el fuselaje se procedió a armar las alas con el fuselaje uniéndolas mediante un tubo de fibra de carbono como se observa en la siguiente imagen 57.



Figura 57 Ensamblando alas con fuselaje

Fuente Elaboración propia

Para Acoplar finalmente las alas con el fuselaje se utilizaron acoples diseñados previamente como se muestra en la siguiente figura 58.



Figura 58 Acoplando alas con fuselaje

Fuente Elaboración propia

Siguiendo con la implementación se procedió a colocar los servomotores que controlaran los alerones, estos se acoplan mediante un mecanismo llamado comercialmente cuernos de timón para aeromodelismo. En la imagen 59 se muestran el acople y el mecanismo.

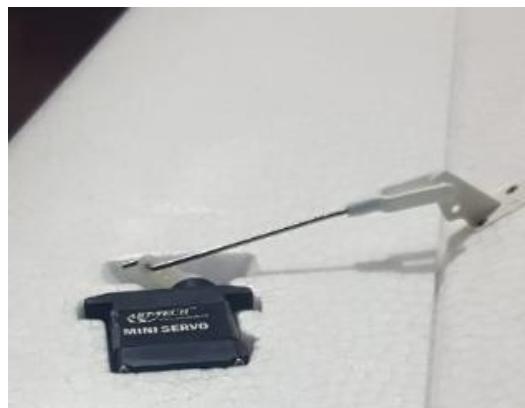


Figura 59 Cuernos de timon

Fuente Elaboración propia

Para poder colocar dentro del fuselaje los componentes eléctricos que necesitemos se diseñó una pieza en la cual serviría de soporte para fijar los componentes y que estas no se muevan durante el vuelo. Esta pieza se muestra en la figura 60 la misma que se imprimió en 3D.



Figura 60 Soporte de componentes

Fuente Elaboración propia

Así mismo, este soporte se pegó en el fuselaje como se muestra en la siguiente imagen 61.

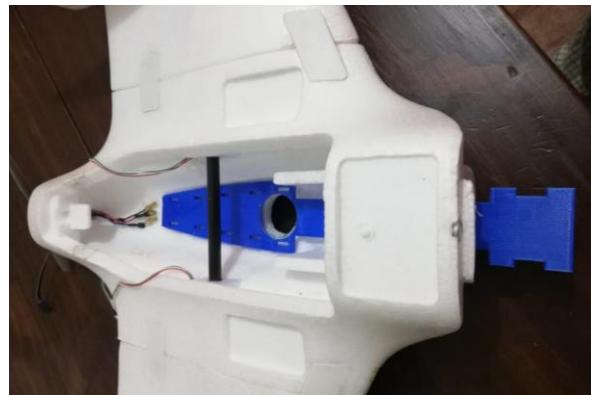


Figura 61 Pegado de soporte

Fuente Elaboración propia

Finalmente, la estructura mecánica del drone está lista para que se acoplen el resto de los componentes eléctricos quedando como se ve en la imagen 62.



Figura 62 Drone armado

Fuente Elaboración propia

3.7. Implementación Eléctrica

Para los cálculos del sistema eléctrico del drone de ala fija, primero se realizó el pesaje de los componentes. Las figuras 63, 64 y 65 muestran parte de este proceso.



Figura 63 Pesaje del Cuerpo central

Fuente: Elaboración propia



Figura 64 Pesaje de alas del drone

Fuente: Elaboración propia



Figura 65 Pesaje de cámara digital

Fuente: Elaboración propia

Luego de calcular la autonomía se procedió a instalar el motor A2212 2450 KV previamente seleccionado, el cual nos asegura el empuje necesario para levantar el drone de 750 gramos de peso. Así mismo se acopló al motor la hélice GEMFAN 6 x 4 como se ve en la figura 66.

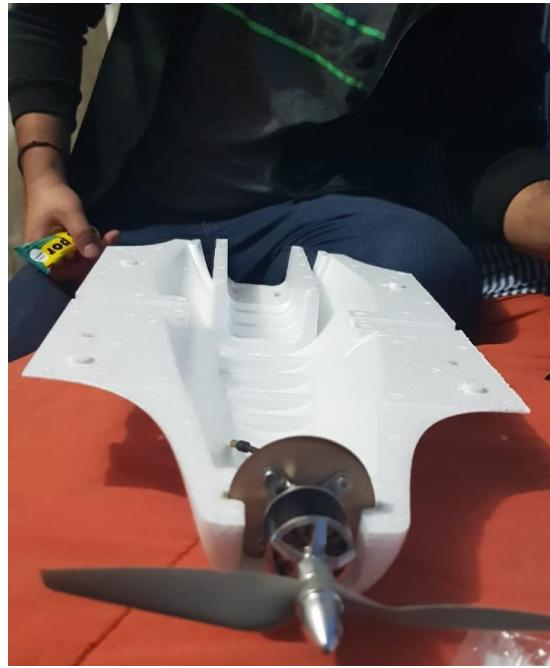


Figura 66 Instalación de motor y hélice

Fuente: Elaboración propia

Para obtener una buena distribución de peso y mantener el centro de gravedad, del drone de ala fija, se instaló la batería de 2200 mAh en la parte delantera del fuselaje, como se muestra en la figura 67, la misma que se fija con correa tipo velcro.

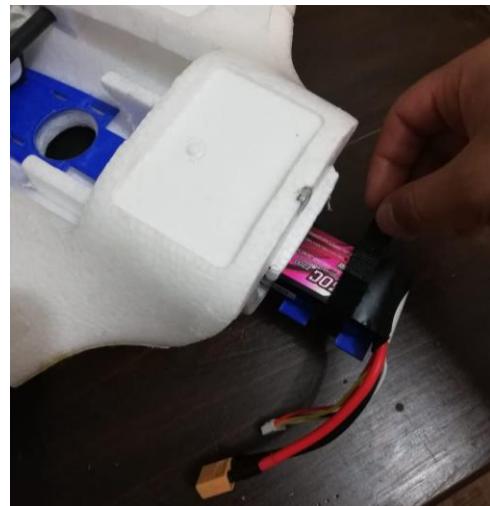


Figura 67 Instalación de batería

Fuente: Elaboración propia

3.8.Implementación electrónica

Para realizar la implementación electrónica primero se realizó el acondicionamiento de algunos componentes. La figura 68 muestra el acondicionamiento del conector para el variador de velocidad.



Figura 68 Acondicionamiento de conector para ESC

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se realizó el acondicionamiento para el conector mini USB, como se muestra en la figura 69, el cual vinculará a la cámara con el controlador ArduPilot.

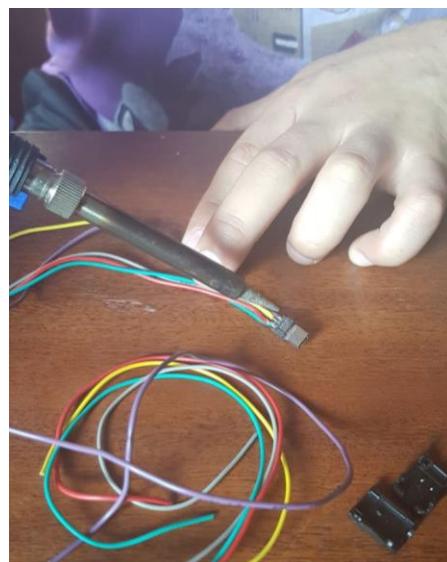


Figura 69 Acondicionamiento de conector para cámara

Fuente: Elaboración propia

Antes de instalar los componentes dentro del drone de ala fija se procedió a realizar el conexionado externo de todos los componentes para verificar su operatividad y además ver las posiciones dentro del drone. En la figura 70 se observa la integración de todos los componentes.

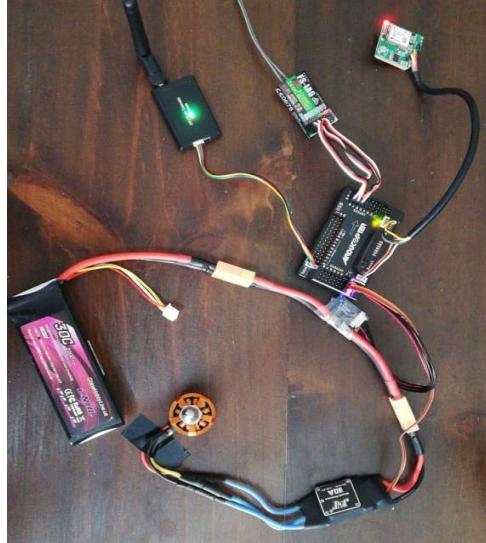


Figura 70 Conexión externa de componentes

Fuente: Elaboración propia

En la figura 71 se muestra la instalación de los micro servos en las alas del drone de ala fija.



Figura 71 Instalación de micro servos

Fuente: Elaboración propia

En la figura 72 se muestra la instalación del variador de velocidad en la parte posterior del fuselaje y su conexión con el motor brushless.

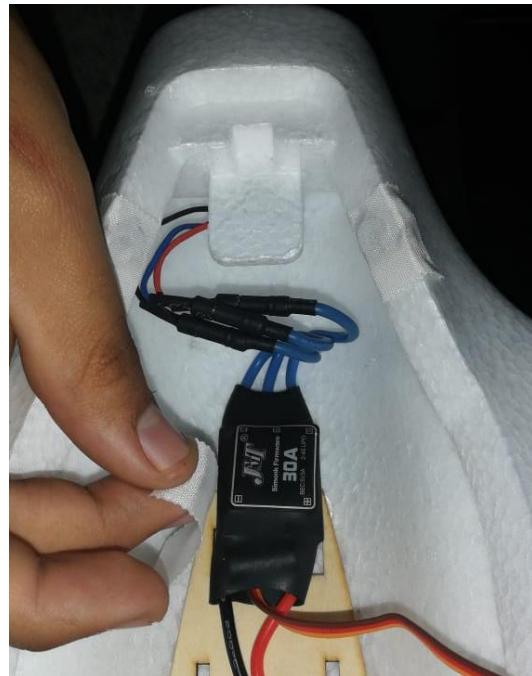


Figura 72 Instalación de variador de velocidad

Fuente: Elaboración propia

En la figura 73 se muestra la instalación del módulo de poder que es el encargado de suministrar la energía proveniente de la batería hacia el controlador y los demás componentes.

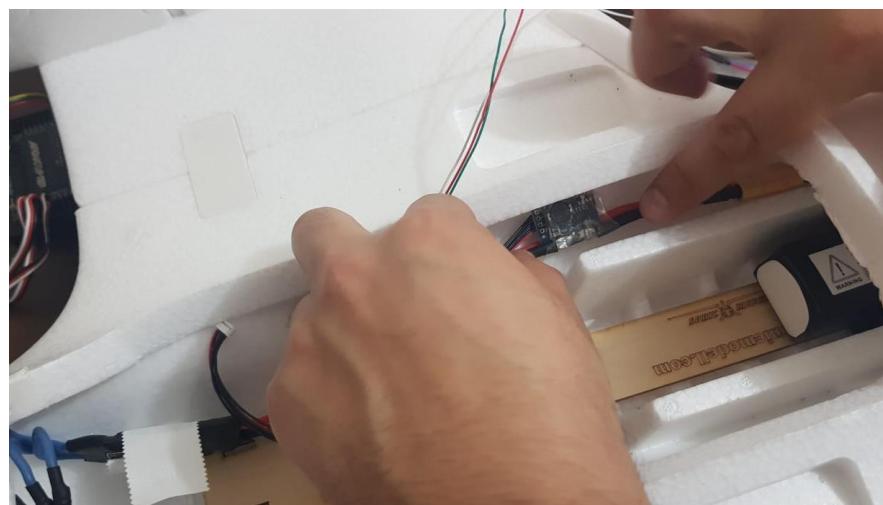


Figura 73 Instalación del módulo de poder

Fuente: Elaboración propia

En la figura 74 se muestra la instalación del ArduPilot, el módulo de telemetría y el receptor RF; en el caso del controlador de vuelo este se posiciono en el centro del drone, para realizar un óptimo resultado al realizar la calibración.

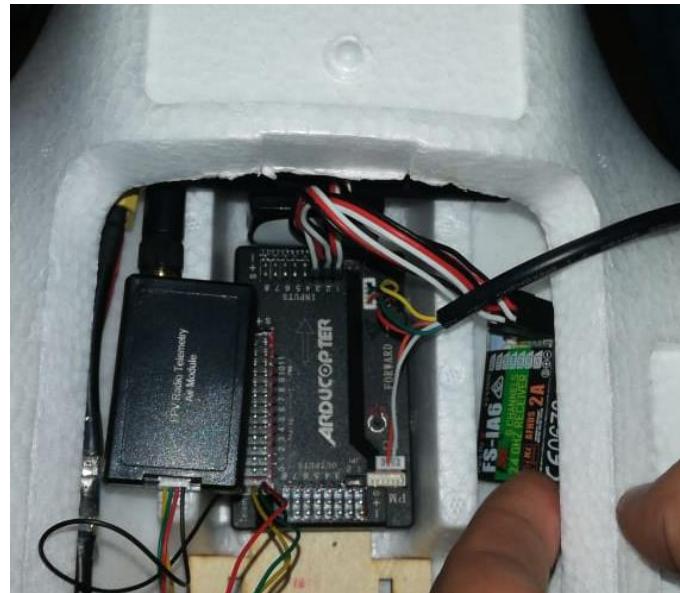


Figura 74 Instalación de APM, telemetría y receptor

Fuente: Elaboración propia

En la figura 75 se muestra la instalación del GPS, el cual georreferenciará al drone de ala fija.

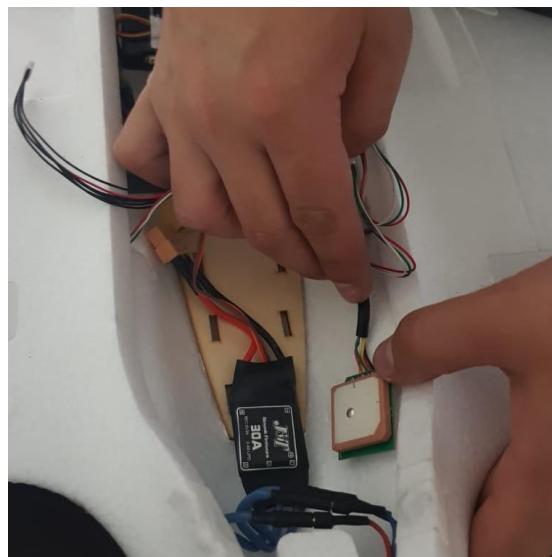


Figura 75 Instalación de GPS

Fuente: Elaboración propia

En la figura 76 se muestra la instalación de la cámara la cual obtendrá la información para el estudio de índices de vegetación.

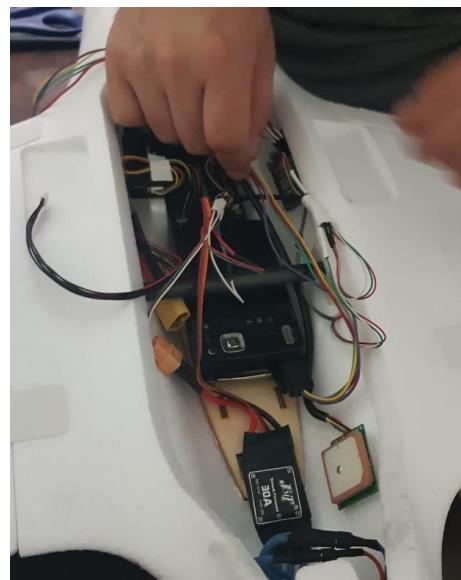


Figura 76 Instalación de cámara

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la figura 77 se muestran los sistemas eléctricos y electrónicos armados completamente y listos para calibrar.

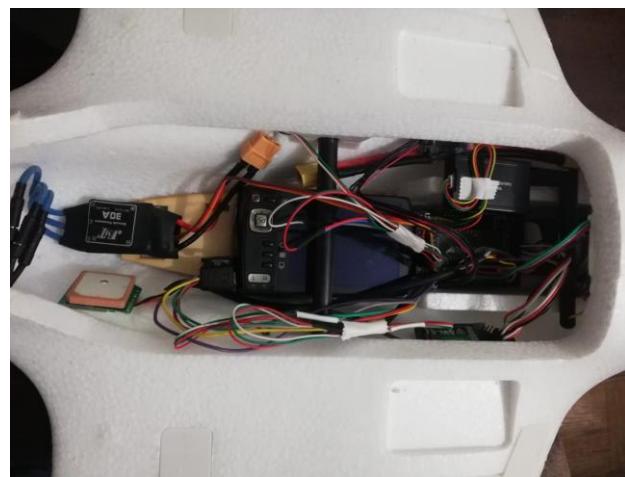


Figura 77 Sistemas eléctrico y electrónico ensamblados

Fuente: Elaboración propia

3.9.Implementación Informática:

3.9.1. Integración de software con drone

Se realizó la instalación del firmware usando el software Mision Planner, este proceso se realizó antes de ensamblar los componentes dentro del drone de ala fija, en la figura 78 se muestra este proceso.



Figura 78 Instalación del firmware

Fuente: Elaboración propia

Luego de lograr la integración se procedió a colocar el hardware dentro del drone para verificar que el software funcionaba correctamente con el resto de los sistemas (ver figura 79).



Figura 79 Integración de sistemas

Fuente: Elaboración propia

3.9.2. Planificación de rutas

Las áreas poligonales convexas pueden ser cubiertas de forma sencilla y eficiente empleando el patrón de movimiento back and forth con dirección perpendicular a la dirección de barido, por lo cual emplearemos dicho patrón para el proceso de planificación de rutas. Como se ve en la siguiente imagen. La planificación de rutas nos permitió realizar las diferentes pruebas como se puede ver en a la siguiente imagen 80.

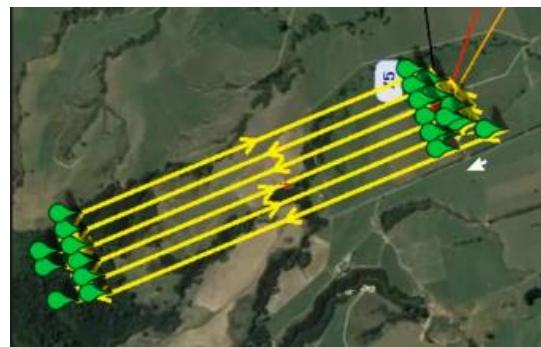


Figura 80 Planificación de ruta

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo corresponde a las pruebas y resultados logrados sobre el funcionamiento del drone de ala fija para el estudio de índices de vegetación para la agricultura de precisión en el fundo Altamirano – Ica. Los resultados que se obtuvieron de las pruebas propuestas sirvieron como referencia en cuanto al cumplimiento de los objetivos propuestos.

4.1. Pruebas de operatividad

Se realizaron pruebas para comprobar y verificar el funcionamiento de cada uno de los componentes y sistemas para lograr el estudio de índices de vegetación en el fundo Altamirano – Ica.

4.1.1. Prueba 1

Consiste en la evaluación del funcionamiento en tierra de los sistemas del drone de ala fija (despegue y giros), funcionamiento interno de los componentes y la vinculación con el software Misión Planner. Lo que se busca es verificar la funcionalidad del drone de ala fija antes de iniciar una ruta de vuelo pre programado.

4.1.2 Prueba 2

Consiste en la evaluación de la sustentación del drone de ala fija con respecto a diferentes velocidades. Lo que se busca con esta prueba es validar que el material y el diseño seleccionados para el drone de ala fija son los adecuados para realizar el plan de vuelo programado.

4.1.3. Prueba 3

Consiste en la evaluación de la autonomía de vuelo que tendrá el drone de ala fija con una capacidad de carga de 750 gramos analizado en diferentes extensiones de terreno. Lo que se busca con esta prueba es validar el factor de empuje/peso propuesto para el drone de ala fija, mientras realiza la ruta de vuelo propuesta.

4.1.4 Prueba 4

Consiste en la obtención de información necesaria para realizar el estudio de índices de vegetación. Lo que se busca con esta prueba es confirmar si las fotos obtenidas por el drone de ala fija nos permiten obtener los índices de vegetación.

4.2. Resultados

A continuación, se presenta los resultados para cada prueba con su respectiva explicación:

4.2.1 Resultados de la prueba 1

En la prueba número 1, se hizo la verificación de funcionamiento en tierra de las partes del drone, para lo cual primero por medio del radio control (Tx) se activó el modo de vuelo manual para luego pasar a verificar por medio del joystick izquierdo la funcionalidad de encendido y aceleración del motor. Luego se procedió a verificar el funcionamiento de los alerones que permiten hacer la elevación, el descenso y los giros al drone de ala fija, esto se realiza mediante el joystick derecho del radio control, así por ejemplo, para realizar la elevación del drone los alerones deben estar inclinados y apuntando hacia arriba, para realizar el descenso los alerones deben estar inclinados y apuntando hacia abajo, para hacer los giros hacia la derecha o hacia la izquierda los alerones deben estar inclinados y apuntando en direcciones opuestas. En las imágenes 81 y 82 se muestra las posiciones de los alerones que se mueven de acuerdo al movimiento del joystick izquierdo.



Figura 81 Prueba de elevación de los alerones

Fuente: Elaboración propia



Figura 82 Prueba de descenso de los alerones

Fuente: Elaboración propia

Luego se procede a verificar el sistema de control del drone, principalmente el sistema de geolocalización mediante el GPS, para esto vinculamos al drone con el software Mision Planner y obtenemos la posición que se muestra en la figura 83 la cual comparamos con la ubicación en tiempo real como se muestra en la imagen 84 verificando el correcto funcionamiento.

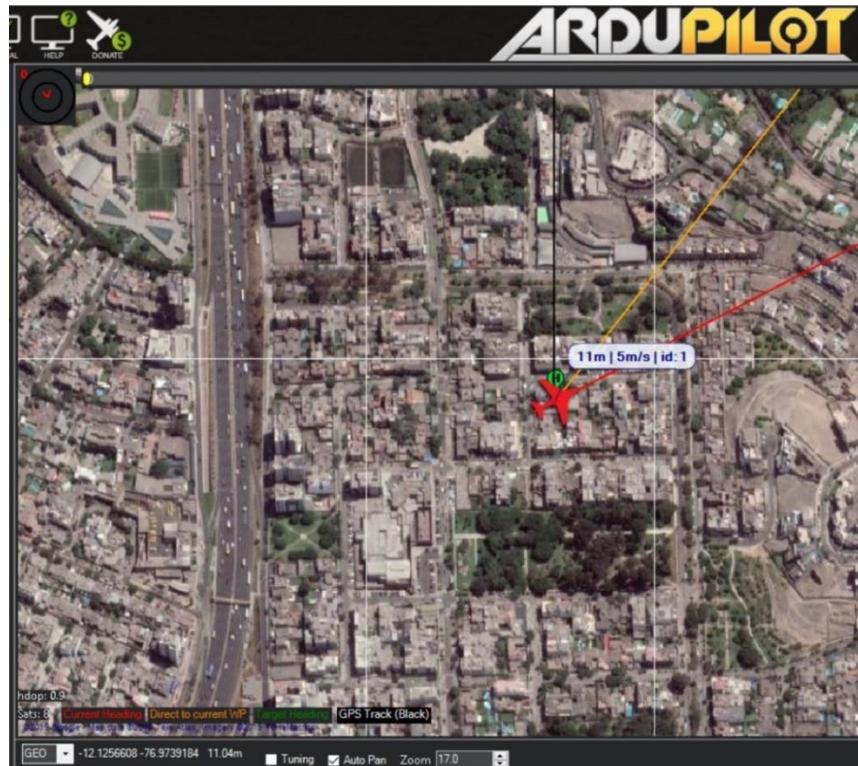


Figura 83 Posicionamiento del GPs del drone

Fuente: Elaboración propia

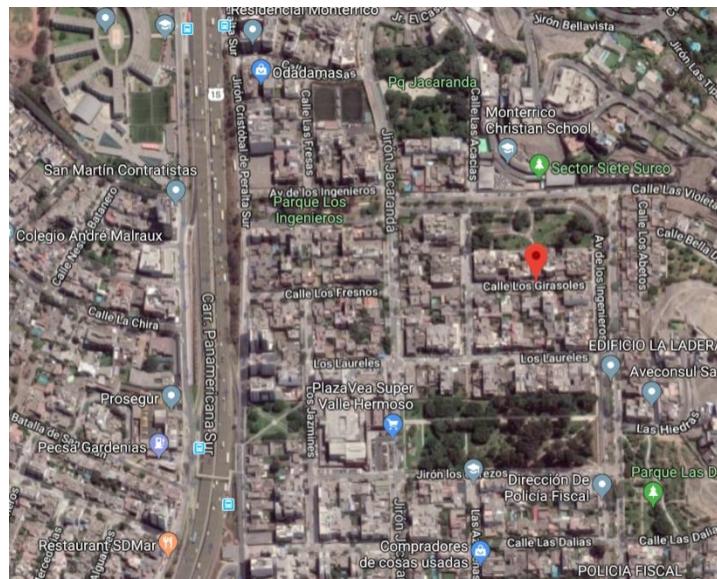


Figura 84 Posicionamiento en tiempo real

Fuente: Google Maps

4.2.2 Resultados de la prueba 2

Para esta prueba en primer lugar se realizó el despegue del drone de ala fija, para lo cual se requieren 2 personas la primera para realizar el lanzamiento del drone con las manos y la segunda para maniobrar el ascenso hasta alcanzar la altura adecuada para activar el plan de vuelo, en la figura 85 y 86 se observan diferentes lanzamientos para el drone de ala fija.



Figura 85 Lanzamiento del drone de ala fija

Fuente: Elaboración propia



Figura 86 Lanzamiento del drone de ala fija

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en las pruebas de lanzamiento se verificaron diferentes potencias con el joystick para el despegue óptimo, tal como se muestra en la tabla N° 17.

Tabla 17 Relación de potencia para despegue

Potencia del Joystick	Despegue
25%	No
50%	No
60%	Si
70%	Si
80%	Si
90%	Si
100%	Si

Fuente: Elaboración propia

En la figura 87 se muestra cuando el drone está realizando su ascenso antes de empezar con el plan de vuelo.



Figura 87 Prueba de sustentación del drone de ala fija

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Resultados de la prueba 3

En esta prueba se realizaron vuelos para extensiones de terreno diferentes hasta llegar progresivamente a la extensión propuesta; se realizó primero, una ruta de vuelo para una extensión de 3 Ha y fuimos incrementando este valor hasta llegar a las 20 Ha propuestas en los cuales se obtuvieron diferentes tiempos los cuales se registraron en la tabla N° 18.

Tabla 18 Relación de extensión de terreno vs tiempo

Extensión de terreno	Tiempo de vuelo
3 Ha	1.12 min
5 Ha	2.15 min
10 Ha	4.20 min
15 Ha	6.37 min
20 Ha	8.35 min

Fuente: Elaboración propia

En la figura 88 y 89 se muestran los diferentes planes de vuelo realizados para la evaluación de la autonomía.



Figura 88 Plan de vuelo con extensión de 5 Ha

Fuente: Elaboración propia



Figura 89 Plan de vuelo con extensión de 20 Ha

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Resultados de la prueba 4

4.2.4.1 Prueba Lima

En esta prueba se probó el cumplimiento del plan de vuelo programado previamente, como se puede ver en las figuras 90 se muestra la captura del desplazamiento del drone al iniciar el plan de vuelo.



Figura 90 Desplazamiento inicial del drone

Fuente: Elaboración propia

En la figura 91 se muestra el drone desplazándose por el tramo final de la ruta programada.

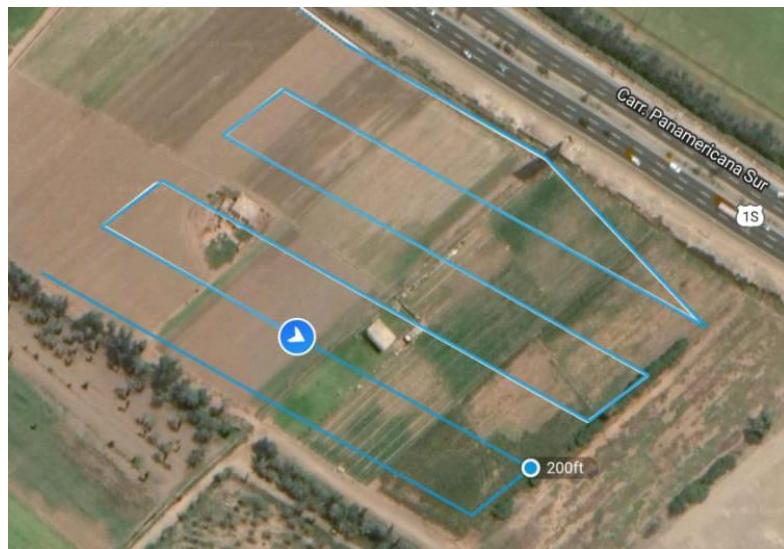


Figura 91 Desplazamiento final del drone

Fuente: Elaboración propia

Se realizó también la obtención de información mediante la captura de imágenes con el drone de ala fija, en el cual se sobrevolaron 4 Hectáreas y se obtuvieron imágenes como se pueden observar en la figura 92.



Figura 92 Imagen de cultivo en lima

Fuente: Elaboración propia

4.2.4.2 Prueba Ica

En esta prueba, se validó la información que se obtuvo por el drone de ala fija la cual servirá para el estudio de índices de vegetación normalizado (NDVI) para el vuelo de 20 Ha. Se obtuvieron 42 fotos las cuales se procesan en el software Pix4D (ver Anexo 5), este software realiza el proceso de unir las imágenes y como resultado se obtiene una ortofoto, con la cual el especialista en agricultura analiza y verifica los índices. En la figura 93 se muestra las imágenes obtenidas por el drone en el plan de vuelo realizado.



Figura 93 Imágenes obtenidas por el drone

Fuente: Elaboración propia

En la figura 94 se muestra la ortofoto obtenida mediante el software Pix4D.



Figura 94 Generación de la ortofoto del terreno con software pix4d

Fuente: Elaboración propia

Así mismo en el software se realiza el procesamiento de las imágenes generando un estudio multiespectral en la zona de estudio (ver Figura 95) con el cual se obtiene el índice de vegetación normalizada.

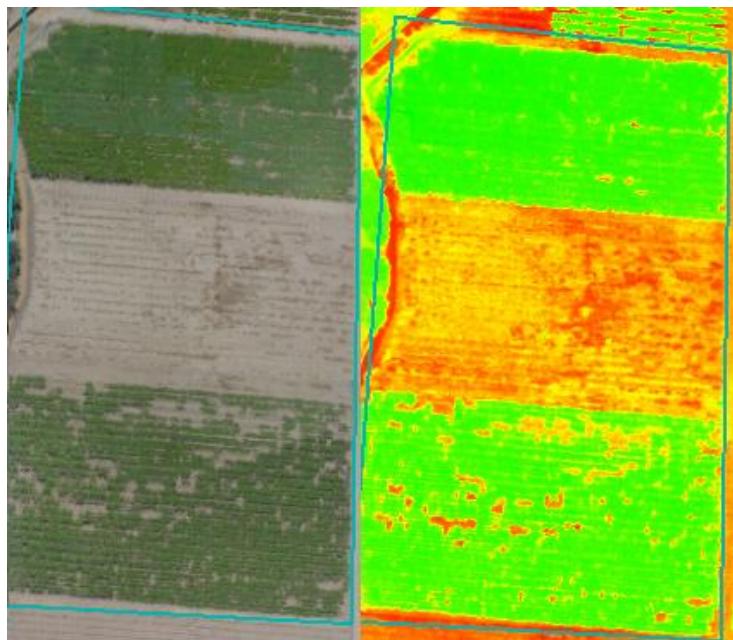


Figura 95 Estudio de índice de vegetación normalizada

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de este estudio con el drone el ingeniero agrónomo pudo hacer una detección temprana de las zonas afectadas, por ejemplo, dentro de los rangos numéricos de 0.3 – 0.35 (color amarillo) se concluye que el riego está siendo deficiente, por lo que se tiene que hacer una mejor aplicación del mismo. Por otro lado, dentro del rango de 0.35 – 0.45 (color verde claro) el ingeniero detecta un estrés biótico, causado por la aparición de una plaga, para lo cual se debe aplicar pesticida en esta zona, realizando así una fumigación focalizada, y no una fumigación general de todo el cultivo, lo que conlleva a un ahorro de costos en fertilizantes.

CONCLUSIONES

Del presente trabajo de tesis, podemos mencionar las siguientes conclusiones:

- 1) Ha sido posible diseñar un drone de ala fija con un peso de 750 gr y con una autonomía de vuelo de 9 min para recorrer una extensión de terreno de 20 Ha. De esta manera el drone de ala fija es capaz de obtener información para realizar el estudio de índices de vegetación normalizada para la agricultura de precisión.
- 2) Ha sido posible diseñar y elaborar un plan de vuelo adecuado en el software Mission Planner el cual permito realizar capturas de imágenes georreferenciadas en la superficie de los cultivos del fundo Altamirano- Ica.
- 3) Ha sido posible realizar un estudio de índices de vegetación en el fundo Altamirano con la información obtenida del drone de ala fija y un software de procesamiento de imágenes.
- 4) El uso vehículos aéreos no tripulados en el campo de la agricultura de precisión es de suma utilidad para llevar un control efectivo de la producción midiendo el estrés hídrico de las plantaciones.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

De la presente investigación podemos mencionar las siguientes observaciones y recomendaciones:

- 1) Dado que el diseño del drone de ala fija se hizo con un software y la elaboración del ala se hizo de manera artesanal, el comportamiento del ala a comparación de la simulación variara dependiendo a la velocidad que el drone se mueva.
- 2) Para aumentar el área de trabajo que cubre el drone se tiene que utilizar baterías de mayor capacidad y peso, por lo que se debe reducir el peso de los demás componentes o aumentar la envergadura del drone. En ambos casos el costo del drone se eleva debido a los componentes te necesarios.
- 3) Se puede observar la importancia de los estudios NDVI en los cultivos al realizar esta investigación en el fundo Altamirano al determinar parte de la biomasa con problemas de estrés hídrico.
- 4) La aplicación y uso de los drones en la agricultura permite que se mejoren procesos de medición dando, así como resultado una mejor supervisión de los cultivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

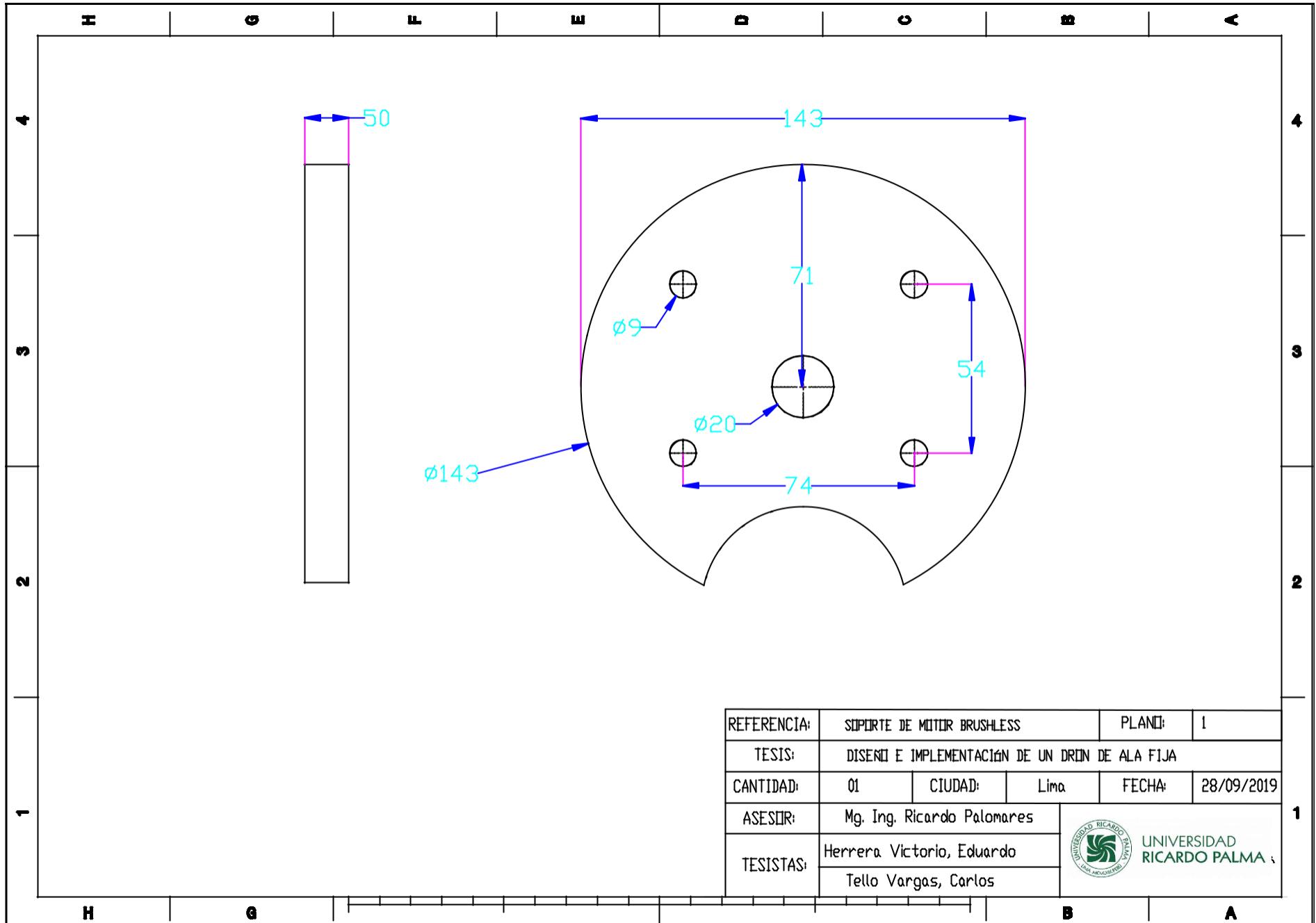
- Casterad, M., & López, R. y. (2008). *Uso de técnicas SIG y teledetección en el seguimiento del cultivo de viña*. Centro de Investigación y tecnología agroalimentaria de Aragón.
- García Domínguez, B. (2011). *Localización óptima de paneles solares en tejados mediante UAV*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- J., T.-S., Peña-Barragán, J., & De Castro-Megías, A. (2013). *Seguimiento multi-temporal de trigo para la detección de malas hierbas en imágenes tomadas desde un vehículo aéreo no tripulado (UAV)*. Madrid: Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA.
- López-Granados, F. (2011). *uso de vehículos aéreos no tripulados (uav) para la evaluación de la producción agraria*. Instituto de Agricultura Sostenible.
- Austin, R. (2010). *Unmanned Air Systems UAV Design, Development an Deployment*. John Wiley & Sons Ltd.
- Barnes W, McComick. (1995), “Aerodynamics, Aeronautics anf Flight Mechanics”. 2da. Ed. Jonh Wiley and Sons Inc.
- Diaz, J. (2015). *Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión (Tesis de Postgrado)*. Universidad Complutense de Madrid, España.
- DRONES.MX. (s.f). Mission Planner. Recuperado de <https://drones.mx/soporte/mission-planner/>
- Escamilla, R. (2010). Diseño, Construcción, Instrumentación y Control de un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV) (Tesis de Pregrado). Instituto Politécnico Nacional – México D.F., México.
- Gomez, M. (2005). *Indice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales (Tesis de Pregrado)*. Universidad de Piura, Perú.
- Ogata, Katsushiko, (2002), “Ingenieria de control moderna”. 4. Ed. España: Prentice Hall.
- R. Bangiovanni, E. Chartuni, S. Best y A. Roel (2006). Agricultura de Precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna. PROCISUR/ICA.

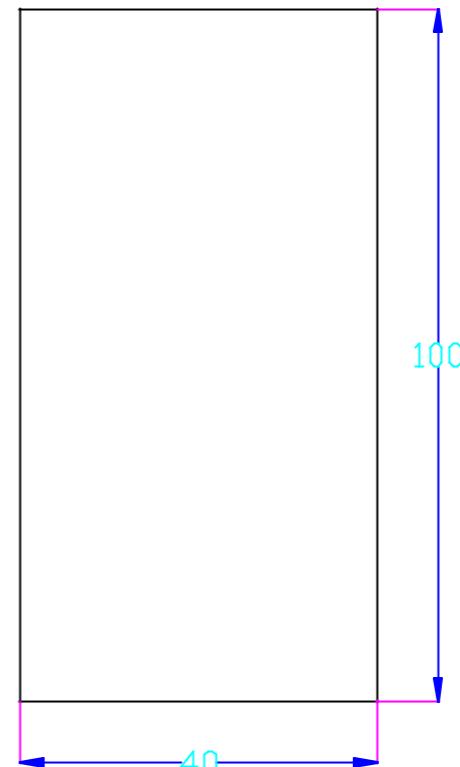
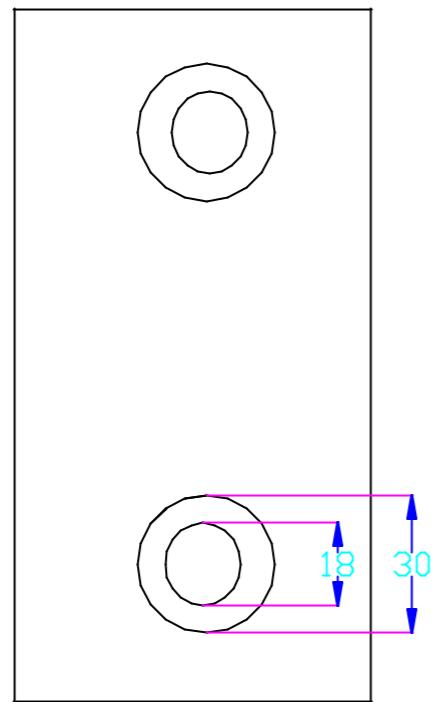
Rabanal, D. (2011). *Integración de un sistema UAV con control autónomo en un equipo aéreo para agricultura de precisión (Tesis de Pregrado)*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

Santamaria, L.(2014). *Desarrollo de un sistema inteligente difuso para apoyar el despegue de aviones no tripulados (Tesis de Pregrado)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

AEROSCAN. (s.f). Topografía Aérea. Recuperado de <http://aeroscan.cl/topografia-aerea/>

ANEXOS

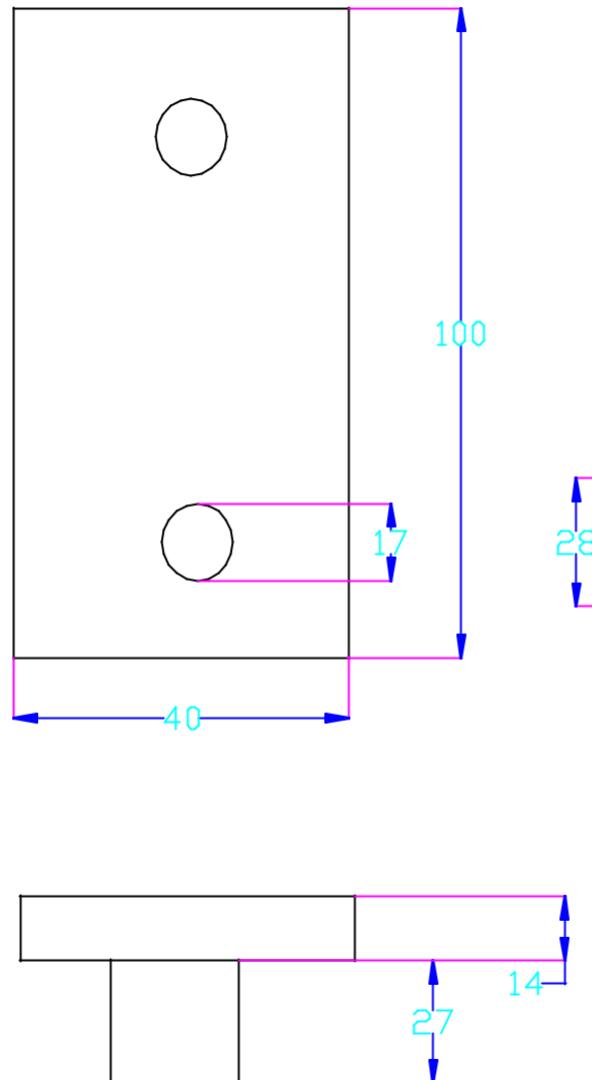




REFERENCIA:	ACOPLE DE ALA INFERIOR			PLANO:	2
TESIS:	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DRON DE ALA FIJA				
CANTIDAD:	01	CIUDAD:	Lima	FECHA:	28/09/2019
ASESOR:	Mg. Ing. Ricardo Palomares				
TESISTAS:	Herrera Victorio, Eduardo				
	Tello Vargas, Carlos				

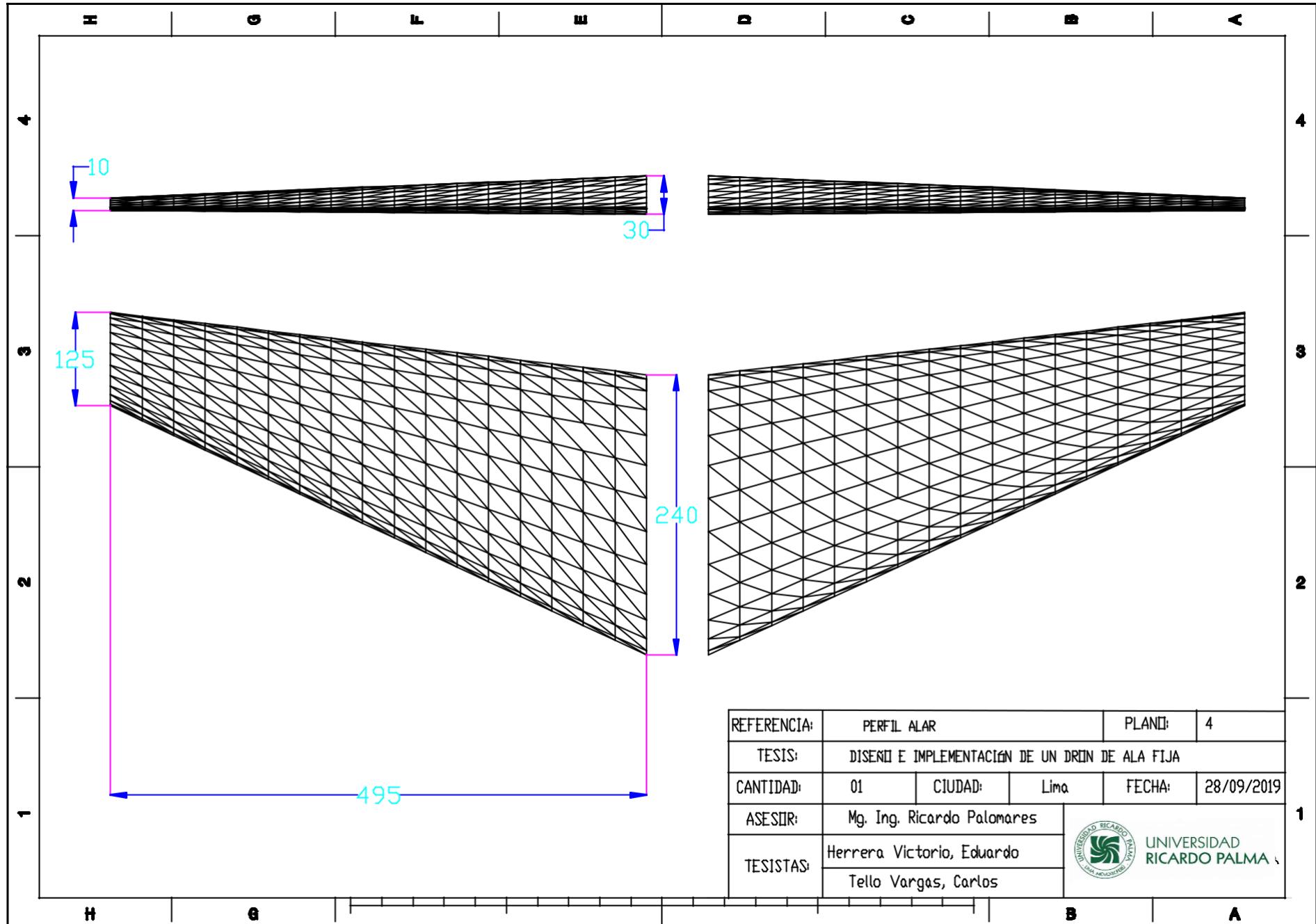


UNIVERSIDAD
RICARDO PALMA



REFERENCIA:	ACOPLE DE ALA SUPERIOR			PLANO:	3
TESIS:	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DRÍN DE ALA FIJA				
CANTIDAD:	01	CIUDAD:	Lima	FECHA:	28/09/2019
ASESOR:	Mg. Ing. Ricardo Palomares				
TESISTAS:	Herrera Victoria, Eduardo Tello Vargas, Carlos				
				UNIVERSIDAD RICARDO PALMA	UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

H G B A



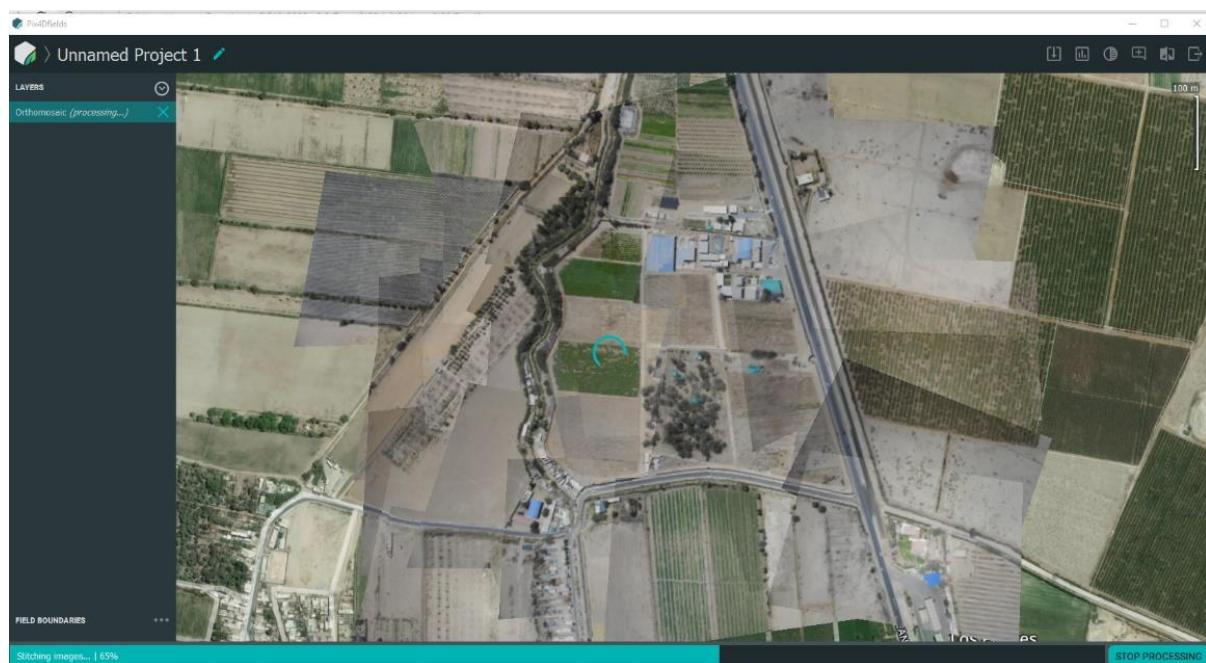
ANEXO Nº 5

Procedimiento de procesamiento de imágenes en software PIX4DFIELDS

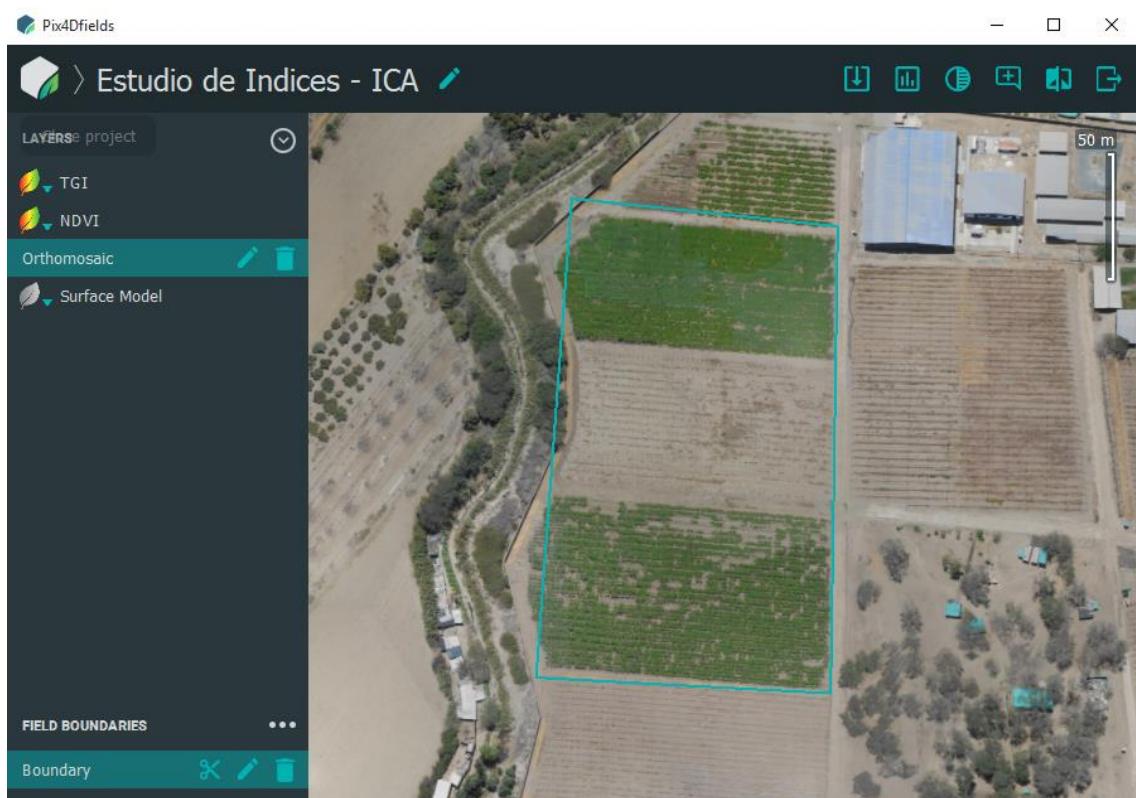
1. Obtener imágenes



2. Importar imágenes y generar ortofoto



3. Seleccionar area de estudio.



4. Procesar la ortophoto para índices NDVI



A2212/13T TECHNICAL

DATA



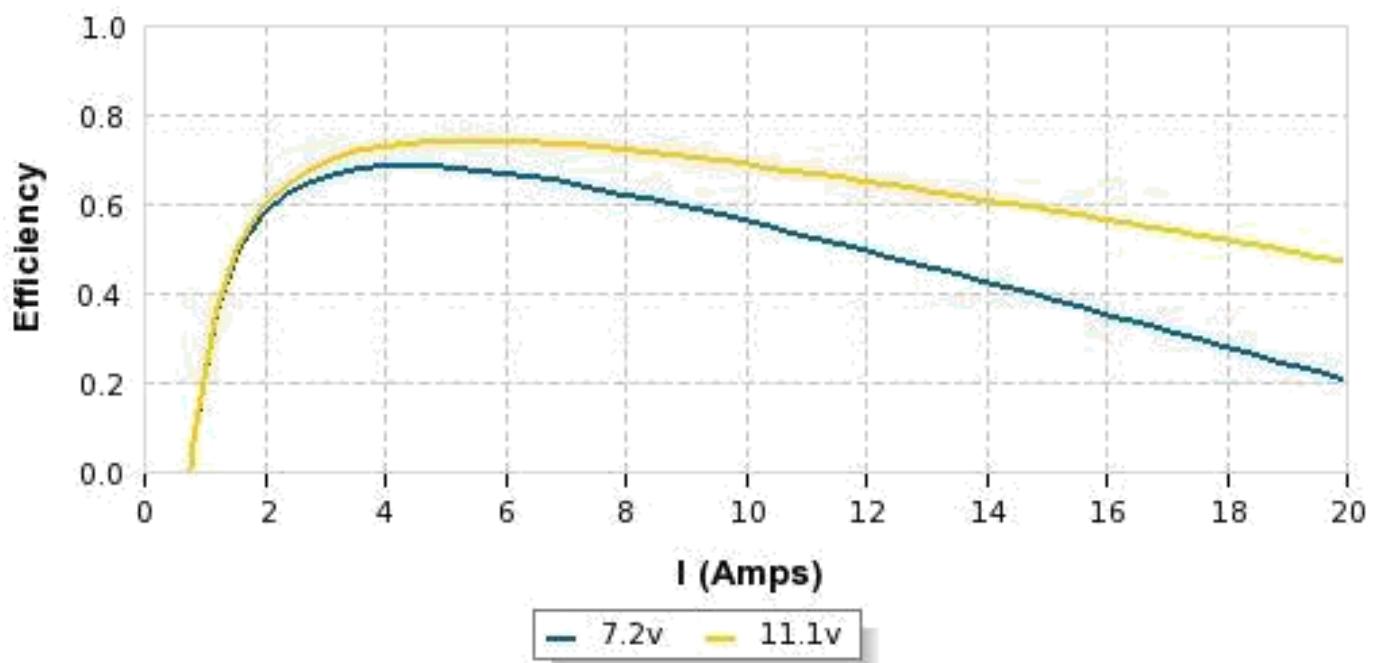
No. of Cells:	2 - 3 Li-Poly 6 - 10 NiCd/NiMH
Kv:	1000 RPM/V
Max Efficiency:	80%
Max Efficiency Current:	4 - 10A (>75%)
No Load Current:	0.5A @ 10V
Resistance:	0.090 ohms
Max Current:	13A for 60S
Max Watts:	150W
Weight:	52.7 g / 1.86 oz
Size:	28 mm dia x 28 mm bell length

Shaft Diameter:	3.2 mm
Poles:	14
Model Weight:	300 - 800g / 10.5 - 28.2 oz

An small yet powerful motor for planes up to 800 grams (28 oz) using 3 li-poly cells. We suggest propping for around 140 watts continuous power with short bursts up to 180 watts. An excellent higher-powered replacement for geared Speed 400-480 motors in slow-flying or 3D planes that require a larger 10" propeller. Use on sailplanes up to 28 oz, trainers up to 25 oz, aerobatic aircraft up to 18 oz and 3D airplanes up to 15 oz. Recommended prop is 10 x 5 on 3 li-poly cells.

The motor features a 3.2mm hardened steel shaft, dual ball bearings, and has 3.5mm gold spring male connectors already attached and includes 3 female connectors for your speed control. Now includes collet type prop adapter and radial motor mount. Mounting holes have 16mm and 19mm spacing on centers and are tapped for 3mm (M3) screws.

Similar to Welgard A2212-13, AXI Gold A2212/26, Welgard C2830-12, E-Flite Park 400. Great replacement motor for a 1/2A Texaco engine.



IO TEST DATA

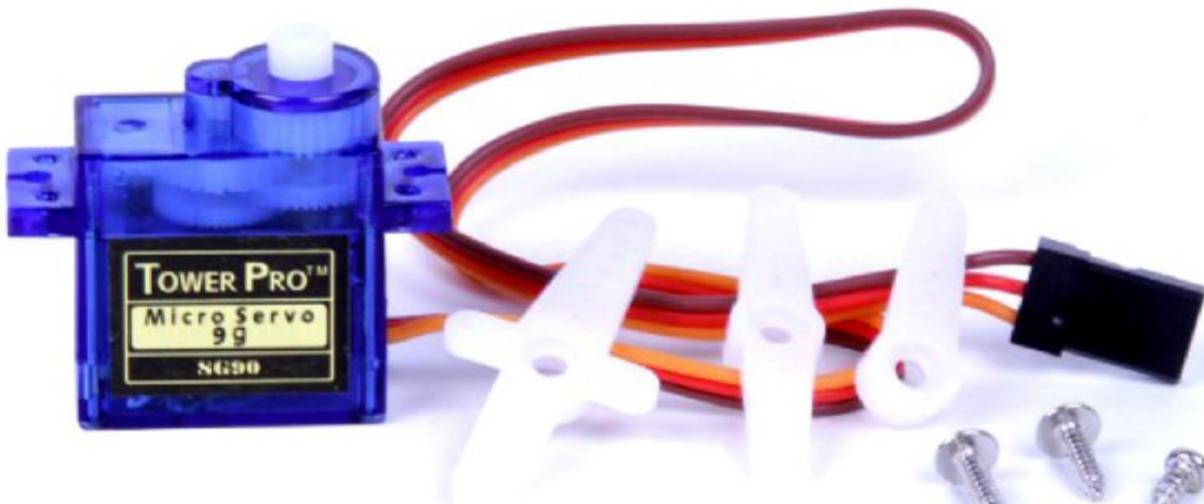
Volts	Amps	RPM
7	0.6	7380
8	0.65	8460
10	0.75	10500

TEST DATA

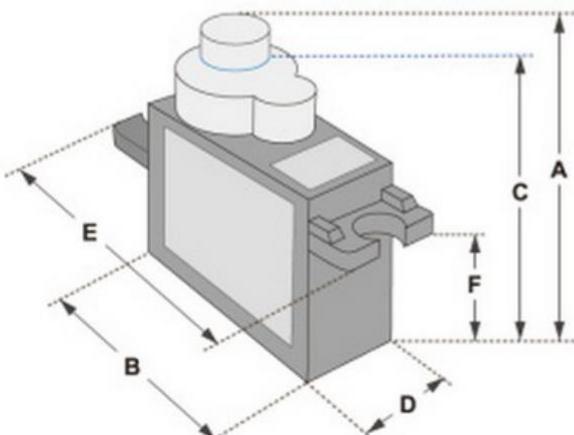
Propeller	Gear Ratio	Volts	Amps	Watts	RPM	S
GWS HD 8x4	1	7	3.35	23	6630	2
GWS HD 8x4	1	7.9	4.1	32	7410	2
GWS HD 8x4	1	8.9	4.85	43	8220	3
GWS HD 8x4	1	9.9	5.65	55	8940	3
GWS HD 8x4	1	10.9	6.5	70	9660	3
GWS HD 9x5	1	6.9	5.5	37	6000	2
GWS HD 9x5	1	7.9	6.7	52	6660	3
GWS HD 9x5	1	8.9	7.85	69	7290	3
GWS HD 9x5	1	9.9	9.25	91	7920	3
APC E 10x5	1	6.9	7	48	5610	2
APC E 10x5	1	7.9	8.45	66	6120	2
APC E 10x5	1	8.9	9.9	88	6690	3
APC E 10x5	1	9.9	11.45	113	7170	3
APC E 10x5	1	10.9	13	141	7650	3
GWS HD 10x6	1	6.9	7.2	49	5610	3
GWS HD 10x6	1	7.9	8.7	68	6180	3
GWS HD 10x6	1	8.9	10.1	89	6690	3
GWS HD 10x6	1	9.9	11.7	115	7200	4
GWS HD 10x6	1	10.9	13.25	144	7680	4
GWS HD 10x8	1	10.8	18.2	196	6390	4

SERVO MOTOR SG90

DATA SHEET



Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction), and works just like the standard kinds but smaller. You can use any servo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.

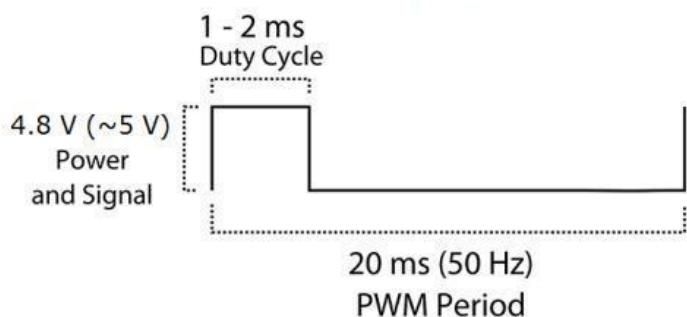


Dimensions & Specifications

A (mm) :	32
B (mm) :	23
C (mm) :	28.5
D (mm) :	12
E (mm) :	32
F (mm) :	19.5
Speed (sec) :	0.1
Torque (kg-cm) :	2.5
Weight (g) :	14.7
Voltage :	4.8 - 6

Position "0" (1.5 ms pulse) is middle, "90" (~2ms pulse) is middle, is all the way to the right, "-90" (~1ms pulse) is all the way to the left.

PWM=Orange (☱☱)
Vcc=Red (+)
Ground=Brown (-)



Manual of RC Timer ESC 30A Brushless Motor Speed Controller

Thanks for purchasing **RC Timer** Electronic Speed Controller (ESC). High power system for RC model can be very dangerous, so we strongly suggest you 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.

Specification

Input voltage: DC 6-16.8V(2-4S Lixx)

Running current:30A(Output: Continuous 30A, Burst 40A up to 10 Secs.)

Size: 26mm (L) * 23mm (W) * 11mm (H).

Weight: 32g.

Features

Extreme low output resistance, super current endurance.

Multiple protection features: Low-voltage cut-off protection / over-heat protection / throttle signal loss protection.

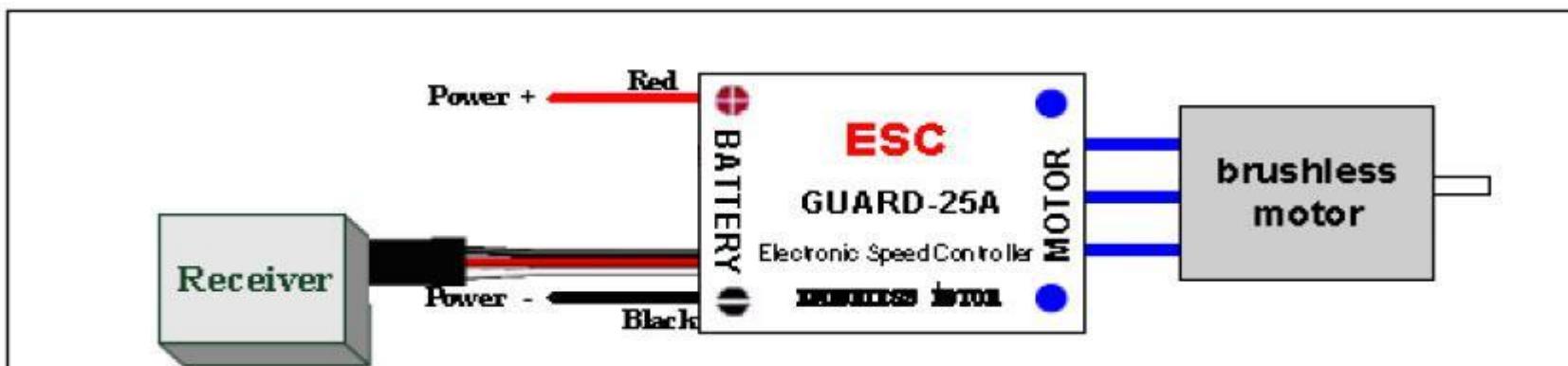
3 start modes: Normal / Soft / Super-Soft, compatible with fixed-wing aircraft and helicopter.

Throttle range can be configured to be compatible with all transmitters currently available on market.

Smooth, linear and precise throttle response.

Separate voltage regulator IC for microprocessor (except Pentium-6A and Pentium-10A), providing good anti-jamming capability. Supported motor speed (Maximum): 210000 RPM (2 poles), 70000 RPM (6 poles), 35000 RPM (12 poles).

Wire Diagram



Very important: if you use banana-shape connectors on main power wires (Input wires), please connect the black wire (negative polarity) BEFORE red wire (positive polarity). So the right

Programmable Items:

- 1. Brake Setting:** Enabled / Disabled, default is Disabled
 - 2. Battery Type:** Li-xx(Li-ion or Li-poly) / Ni-xx(NiMH or NiCd), default is Li-xx.
 - 3. Low Voltage Protection Mode(Cut-Off Mode):** Soft Cut-Off (Gradually reduce the output power) or Cut-Off (Immediately stop the output power). Default is Soft Cut-Off.
 - 4. Low Voltage Protection Threshold(Cut-Off Threshold):** Low / Medium / High, default is Medium.
- 1) For lithium batteries,** the number of battery cells is calculated automatically. Low / medium / high cutoff voltage for each cell is: 2.6V/2.85V/3.1V. For example: For a 3 cells lithium pack, when "Medium" cutoff threshold is set, the cut-off voltage will be: $2.85 \times 3 = 8.55V$.

2) For nickel batteries, low / medium / high cutoff voltages are 0%/45%/60% 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 10 cells NiMH battery, fully charged voltage is $1.44 \times 6 = 8.64V$, when "Medium" cut-off threshold is set, the cut-off voltage will be: $8.64 \times 50\% = 4.3V$.

- 5. Startup Mode:** Normal /Soft /Super-Soft, default is Normal.

Normal is preferred for fixed-wing aircraft. Soft or Super-soft are preferred for helicopters. The initial acceleration of the Soft and Super-Soft modes are slower in comparison, usually taking 1 second for Soft startup or 2 seconds for Super-Soft startup from initial throttle advance to full throttle. If the throttle is closed (throttle stick moved to bottom) and opened again (throttle stick moved to top) within 3 seconds of the initial startup, the restart-up will be temporarily changed to normal mode to get rid of the chances of a crash caused by slow throttle response. This special design is very suitable for aerobatic flight when quick throttle response is needed.

- 6. Timing:** Low / Medium / High, default is Low.

Usually, low timing value can be used for most motors. We recommend the Low timing value for 2 poles motor and Medium timing value for motors with more than 6 poles to get a high efficiency. For higher speed, High timing value can be chosen.

Special Note

Some high KV out-runner motors have very special construction, the space between each magnet is very large, and many ESCs can't drive these motors. After much testing, our ESCs have proven to work very well with these types of motors. Therefore, we have provided some suggestions as follows:

Programmable Motor	Timing	Startup mode
Generic in-runner motor	Low	
Generic out-runner motor	Low or Medium	Usually, aircraft use "Normal" startup mode and helicopter use "super-soft" startup mode
Align 420LF (Made in TAIWAN, out-runner)	High (MUST)	
450TH (Made in TAIWAN)	Low	Soft(MUST)

Begin To Use Your New ESC

Please start the ESC in the following sequences:

1. Move the throttle stick to the bottom position and then switch on the transmitter.
2. Connect the battery pack to the ESC, the ESC begins the self-test process, a special tone "123" is emitted, which means the voltage of the battery pack is in normal range, and then N "beep" tones will be emitted, means the number of lithium battery cells. Finally a long "beep-----" tone will be emitted, which means self-test is OK, the aircraft/ If a special tone "56712" is emitted after 2 beep tones ("beep-beep-"), means the ESC has entered the program mode, it is because the throttle channel of your transmitter is reversed, please set it correctly;

If the very rapid “beep-beep-, beep-beep-” tones is emitted, means the input voltage is too low or too high, please check your battery’s voltage.

Normal startup procedure:

Move throttle stick to bottom and then switch on transmitter. 	Connect battery pack to ESC, special tone like “1 2 3” means power supply is OK	Several “beep-” tones should be emitted, presenting the number of lithium battery cells	When self-test is finished, a long “beep----” tone should be emitted	Move throttle stick upwards to go flying
--	---	---	--	--

“VERY IMPORTANT !” Because different transmitter has different throttle range, we strongly suggest you using the “Throttle Range Setting Function” to calibrate throttle range. Please read the instruction on page 4-----“Throttle Range Setting”.

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

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

Alert Tone

1. Input voltage is abnormal: The ESC begins to check the voltage when the battery pack is connected, if the voltage is not in the acceptable range, such an alert tone will be emitted: “beep-beep-, beep-beep-,beep-beep-” (Every “beep-beep-” has a time interval of about 1 second.)
2. Throttle signal is abnormal: When the ESC can’t detect the normal throttle signal, such an alert tone will be emitted: “beep-, beep-, beep-”. (Every “beep-” has a time interval of about 2 seconds)
3. Throttle stick is not in the bottom position: When the throttle stick is not in bottom (lowest) position, a very rapid alert tone will be emitted: “beep-, beep-, beep-”. (Every “beep-” has a time interval of about 0.25 second.)

Protection Function

1. Abnormal start up 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.)
2. Over-heat protection: When the temperature of the ESC is over 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 its output to be cut-off completely.

Program the ESC with your transmitter (4 Steps):

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

1. Enter program mode

- 1) Switch on transmitter, move throttle stick to top, 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 "56712" should be emitted, which means program mode is entered

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-"

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; Moving the stick to bottom within 2 seconds will exit program mode directly)

4. Exit program mode

There are 2 ways to exit program mode:

Tones Items	"beep-" 1 short tone	"beep-beep-" 2 short tones	"beep-beep-beep" 3 short tones
Brake	off	on	
Battery type	Li-ion / Li-poly	NiMH / NiCd	
Cutoff mode	Soft-Cut	Cut-off	
Cutoff threshold	Low	Medium	High
Start mode	Normal	Soft	Super soft
Timing	Low	Medium	High

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-----"(ie. The item #8), move throttle stick to bottom within 3 seconds.

Program Example

Setting "Start Mode" to "Super-Soft", i.e. value #3 in the programmable item #5

1. Enter Program Mode: Switch on transmitter, move throttle stick to top position, connect battery pack to ESC, wait for 2 seconds, "beep-beep" tone should be emitted. Then wait for another 5 seconds, special tone like "56712" should be emitted, which means program mode is entered.
2. Select Programmable Items: Now you'll hear 8 tones in a loop. When a long "beep-----" tone is emitted, move throttle stick to bottom to enter the "Start Mode"
3. Set Item Value (Programmable Value): "Beep-", wait for 3 seconds; "Beep-beep-", wait for another 3 seconds; then you'll hear "beep-beep-beep", move throttle stick to top position, then a special tone "1515" is emitted, now you have set the "Start Mode" item to the value of "Super-Soft"
4. Exit Program Mode: After the special tone "", move throttle stick to bottom within 2 seconds.

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.The balance charge connector is not located properly in BDMP adapter.	Check the voltage of battery pack Check the connection of the balance charge connector and the BDMP adapter.
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 "56712" 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
The motor stop running while in working state	Throttle signal is lost	Check the receiver and transmitter Check the cable of throttle channel
	ESC has entered Low Voltage Protection mode	Land RC model as soon as possible, and then replace the battery pack
	Some connections are not reliable	Check all the connections: battery pack connection, throttle signal cable, motor connections, etc.
Random stop or restart or irregular working state	There is strong electro-magnetic interference in flying field.	Reset the ESC to resume normal operation. If the function could not resume, you might need to move to another area to fly.

