

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHICULO AÉREO NO TRIPULADO
CON SISTEMA DE DESPEGUE Y ATERRIZAJE VERTICAL UTILIZANDO
TECNOLOGÍAS DE MANUFACTURA ADITIVA PARA EL SECTOR AGRÍCOLA

AUTORES:

JOSE MANUEL VILLA ROMERO

JUAN DIEGO BEJARANO LOPEZ

PROYECTO DE GRADO
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



**Universidad Tecnológica
de Pereira**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
PEREIRA, RISARALDA
2023

TRABAJO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO EN MECATRONICA

MSc. ADONÁÍ ZAPATA GORDON

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN VEHICULO AEREO NO TRIPULADO
CON SISTEMA DE DESPEGUE Y ATERRIZAJE VERTICAL UTILIZANDO
TECNOLOGIAS DE MANUFACTURA ADITIVA PARA EL SECTOR AGRÍCOLA

JOSE MANUEL VILLA ROMERO
JUAN DIEGO BEJARANO LOPEZ

INGENIERÍA EN MECATRONICA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PEREIRA, RISARALDA
2023

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a:

- ◆ Queremos aprovechar este espacio para expresar nuestro profundo agradecimiento a todas las personas que nos han apoyado durante el proceso de realización de esta tesis.
- ◆ En primer lugar, queremos agradecer de manera especial a nuestros directores de tesis, Adonai Zapata Gordon por su orientación, paciencia y dedicación a lo largo de todo este proyecto. Sus conocimientos expertos, su guía constante y su motivación han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.
- ◆ También queremos agradecer a nuestros compañeros de carrera, por su colaboración, intercambio de ideas y apoyo mutuo. Juntos hemos superado desafíos y logrado resultados significativos. Su valiosa contribución ha enriquecido considerablemente este trabajo.
- ◆ Además, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestros padres. Su amor incondicional, apoyo emocional y confianza en nosotros han sido fundamentales en nuestro camino académico. Su constante aliento y sacrificio han sido fuentes de inspiración para perseverar en cada etapa de esta investigación.
- ◆ Por último, pero no menos importante, queremos agradecer a nuestros hermanos. Su apoyo incondicional, palabras de aliento y motivación constante nos han ayudado a superar los momentos más difíciles de este proceso. Su confianza en nuestras capacidades y su presencia han sido pilares fundamentales en nuestras vidas.
- ◆ A todas estas personas, nuestra gratitud eterna. Sin su valioso respaldo, esta tesis no habría sido posible. Sus contribuciones y apoyo han dejado una huella imborrable en nuestras carreras académicas y en nuestras vidas personales.

CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
1. Definición de la propuesta	1
1.1. Introducción	1
1.2. Definición del problema	1
1.2.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2.2. Formulación del problema	2
1.2.3. Sistematización	2
1.3. Delimitación	2
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Justificación	3
CAPÍTULO 2	5
2. Fundamentación teórica de la aeronautica, los vehículos aéreos no tripulados e impresión 3D	5
2.1. Generalidades de la aeronáutica	5
2.1.1. Aerodinámica	5
2.2. Los VANT y RPAS (drones).....	13
2.2.1. Clasificación según el tipo de aplicación	13
2.2.2. Clasificación según la disposición del perfil alar	15
2.2.3. Componentes de un VANT	16
2.3. Diseño asistido por computador (CAD).....	24
2.3.1. Solidworks	24
2.3.2. Inventor	25
2.3.3. CATIA.....	26
2.3.4. Fusion 360	26
2.4. Manufactura aditiva (MA).....	27
2.4.1. Orígenes	27
2.4.2. Clasificación de los procesos de MA.....	29
2.4.3. Proceso general	34
2.4.4. Slicer 3D.....	36
2.4.5. Parámetros de impresión	38

2.4.6. La MA en la aeronáutica	42
CAPITULO III	44
3. Diseño de la aeronave	44
3.1. Antecedentes de los drones	44
3.1.1. Antecedentes internacionales	44
3.1.2. Antecedentes nacionales	46
3.2. Características de las piezas	47
3.3. Creación de las piezas.....	48
3.3.1. Alas	48
3.3.2. Fuselaje.....	52
3.3.3. Empenaje	54
3.3.4. Accesorios.....	57
3.4. Construcción y ensamblaje.....	59
3.5. Componentes de los sistemas de control y electrónico	63
3.5.1. Autopiloto PIXHAWK 2.4.8.....	63
3.5.2. Motores brushless	65
3.5.3. Servomotores	65
3.5.4. Speed Control (Controlador de velocidad)	67
3.5.5. Módulo 3DR	67
3.5.6. UBEC	68
3.5.7. Batería Li-Po	68
3.5.8. Control remoto.....	68
3.5.9. GPS.....	69
3.6. Conexiones del sistema electrónico	70
3.6.1. Sensores y periféricos.....	70
3.6.2. Comunicación con el radio control (RC).....	71
3.6.3. Alimentación del autopiloto	72
3.7. Configuración del autopiloto	73
3.7.1. Carga del firmware	74
3.7.2. Calibración del radiocontrol RC.....	76
3.7.3. Calibración del acelerómetro.....	77
3.7.4. Configuración del drone como Tricopter	78
3.7.5. Configuración de las salidas del autopiloto	79

3.7.6. Configuración de los modos de vuelo	83
CAPÍTULO IV.....	85
4. Resultados	85
4.1. Diseño mecánico del VANT con tecnología VTOL	85
4.2. Conexión de los sistemas electrónicos y de control	87
4.3. Validación de la configuración del autopiloto	89
5. Conclusiones.....	93
6. Recomendaciones.....	94
7. Referencias	95
8. Anexos	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fuerzas que experimenta la aeronave [11].....	9
Figura 2.2. Efecto del flujo de aire sobre distintas superficies [14].	10
Figura 2.3. Partes de un perfil alar [15].	11
Figura 2.4. Sustentación en un perfil alar [13].	12
Figura 2.5. Clasificación de los usos de los drones [19].	14
Figura 2.6. Ejemplo dron de ala fija [20].	15
Figura 2.7. Ejemplo dron de ala rotatoria [21].	16
Figura 2.8. Convertiplano Bell Augusta BA609 [22].	16
Figura 2.9. Diagrama motor brushless [24].	18
Figura 2.10. Motor brushless inrunner y outrunner [27].	19
Figura 2.11. Batería tipo Li-Po [28].	20
Figura 2.12. Hélices [29].	20
Figura 2.13. Speed Control Little Bee 20 A de 4S [30].	21
Figura 2.14. Pixhawk 3DR [32].	22
Figura 2.15. Ardupilot Arducopter [33].	23
Figura 2.16. Ensamblaje de una máquina en SolidWorks [38].	25
Figura 2.17. Ensamblaje de una máquina en Inventor [39].	25
Figura 2.18. Múltiples estilos de una silla diseñada en CATIA [40].	26
Figura 2.19. Diseño de un carrito en Fusion 360 [41].	27
Figura 2.20. Charles ‘Chuck’ Hull inventor de la estereolitografía [43].	28
Figura 2.21. Máquina de estereolitografía SLA-1 [44, p. 7].	28
Figura 2.22. Clasificación de los procesos de manufactura aditiva [42, p. 30].	29
Figura 2.23. Modelado por deposición fundida [45].	30
Figura 2.24. Impresora 3D FDM [46].	30
Figura 2.25. Estereolitografía [45].	31
Figura 2.26. Impresora 3D SLA [45].	31
Figura 2.27. Comparación pieza FDM (izquierda) vs SLA (derecha) [45].	32
Figura 2.28. Sinterizado selectivo por láser [45].	32
Figura 2.29. Impresión 3D SLS [47].	33
Figura 2.30. Superficie de pieza impresa con SLS [45].	34
Figura 2.31. Pasos genéricos en la construcción de una pieza con MA [42, p. 5].	36
Figura 2.32. Interfaz de usuario software Cura [48].	37
Figura 2.33. Interfaz de usuario software Simplify 3D [48].	37
Figura 2.34. Interfaz de usuario software Slic3r [48].	38
Figura 2.35. Pieza de impresión 3D con borde [49].	40
Figura 2.36. Altura de capas impresión FDM [50].	41
Figura 2.37. Diferentes tipos de relleno: panal de abejas, concéntrico y rectilíneo [49, p. 59].	41
Figura 2.38. Llave hexagonal impresa con Onyx [51].	42
Figura 2.39. Piezas impresas en metal [51].	43
Figura 3.1. Prototipo de Airbus A3 Vahana [53].	45
Figura 3.2. Airbus THOR [54].	45
Figura 3.3. UAV Coelum fabricado por la CIAC [57].	46

Figura 3.4. Raíz del ala - vista isométrica intradós [Autores].	49
Figura 3.5. Raíz del ala - vista isométrica borde de salida [Autores].	49
Figura 3.6. Extensión del ala - vista isométrica [Autores].	50
Figura 3.7. Soporte motor – vista isométrica [Autores].	50
Figura 3.8. Alerón raíz – vista isométrica [Autores].	51
Figura 3.9. Alerón extensión – vista isométrica [Autores].	51
Figura 3.10. Winglets - vista isométrica [Autores].	52
Figura 3.11. Cuerpo del fuselaje – vista isométrica frontal [Autores].	53
Figura 3.12. Cuerpo del fuselaje - vista isométrica trasera [Autores].	53
Figura 3.13. Punta del fuselaje - vista isométrica [Autores].	54
Figura 3.14. Tapa del fuselaje - vista isométrica [Autores].	54
Figura 3.15. Empenaje de la aeronave - vista isométrica [Autores].	55
Figura 3.16. Sección central empenaje - vista isométrica [Autores].	55
Figura 3.17. Elevador - vista isométrica [Autores].	56
Figura 3.18. Estabilizadores horizontales - vista isométrica [Autores].	56
Figura 3.19. Timón de dirección - vista isométrica [Autores].	57
Figura 3.20. Soporte servomotores traseros - vista frontal isométrica [Autores].	57
Figura 3.21. Soporte servomotores traseros - vista posterior isométrica [Autores].	58
Figura 3.22. Soporte tren delantero – vista isométrica [Autores].	58
Figura 3.23. Pie tren de aterrizaje - vista isométrica [Autores].	59
Figura 3.24. Soporte motores - vista isométrica [Autores].	59
Figura 3.25. Raíz del ala en formato STL [Autores].	60
Figura 3.26. Raíz del ala en Creality Slicer [Autores].	60
Figura 3.27. Impresión pieza raíz del ala [Autores].	61
Figura 3.28. Impresión cuerpo del fuselaje con soportes [Autores].	61
Figura 3.29. Ensamblaje del fuselaje y alas [Autores].	62
Figura 3.30. Ensamblaje de motores brushless [Autores].	62
Figura 3.31. Ensamblaje servomotor alerón [Autores].	63
Figura 3.32. Pines de conexión PIXHAWK PX4 2.4.8 - panel frontal [59].	63
Figura 3.33. Motor Brushless Racerstar BR4114 [Autores].	65
Figura 3.34. Servomotor MG995 [60].	66
Figura 3.35. Servomotor Corona CS-929MG [Autores].	66
Figura 3.36. ESC Makerfire 35A [Autores].	67
Figura 3.37. Módulo de alimentación [Autores].	67
Figura 3.38. UBEC Assan 2-10S Lipo [Autores].	68
Figura 3.39. Batería MULTISTAR 5200 mAh [Autores].	68
Figura 3.40. Control remoto Microzone MC 6-C [Autores].	69
Figura 3.41. Módulo GPS con brújula M8N [Autores].	69
Figura 3.42. Conexión del switch de seguridad y el buzzer [Autores].	70
Figura 3.43. Conexión del módulo GPS [Autores].	71
Figura 3.44. Conexión del módulo de telemetría [Autores].	71
Figura 3.45. Conexión del encoder PPM [Autores].	72
Figura 3.46. Conexión de la alimentación del autopiloto [Autores].	72
Figura 3.47. Conexión del BEC al autopiloto [Autores].	73

Figura 3.48. Interfaz de inicio Mission Planner [Autores].	73
Figura 3.49. Interfaz instalación del firmware [Autores].	74
Figura 3.50. Selección del archivo del firmware [Autores].	74
Figura 3.51. Progreso de la instalación del firmware [Autores].	75
Figura 3.52. Carga del firmware [Autores].	75
Figura 3.53. Parámetros de conexión inicial [Autores].	75
Figura 3.54. Parámetros de conexión en curso [Autores].	75
Figura 3.55. Calibración control RC comienzo [Autores].	76
Figura 3.56. Mensajes de advertencia calibración del control [Autores].	76
Figura 3.57. Calibración de límites del control RC [Autores].	76
Figura 3.58. Mensaje final calibración RC [Autores].	77
Figura 3.59. Valores límite del control RC [Autores].	77
Figura 3.60. Calibración del acelerómetro [Autores].	78
Figura 3.61. Configuración como QuadPlane [Autores].	78
Figura 3.62. Tipo de frame de la aeronave y sentido de giro de los motores [63].	79
Figura 3.63. Configuración del parámetro Q_FRAME_CLASS. [Autores].	79
Figura 3.64. Opciones de configuración salidas PWM [Autores].	80
Figura 3.65. Salidas PWM de los motores Mission Planner [Autores].	81
Figura 3.66. Salidas de los alerones en Mission Planner [Autores].	81
Figura 3.67. Salidas timón de dirección y elevador [Autores].	81
Figura 3.68. Salidas de los tilt rotores [Autores].	81
Figura 3.69. Visualización de las salidas PWM en Mission Planner [Autores].	82
Figura 3.70. Selección del canal para los modos de vuelo [Autores].	83
Figura 3.71. Configuración de los modos de vuelo [Autores].	83
Figura 3.72. Parámetro Q_FRAME_TYPE [Autores].	83
Figura 3.73. Parámetro Q_TILT_TYPE [Autores].	83
Figura 3.74. Lista seleccionable Tiltrotor mask [Autores].	84
Figura 3.75. Parámetro Q_TILT_MASK [Autores].	84
Figura 4.1. Diseño completo - Vista isométrica [Autores].	85
Figura 4.2. Elementos electrónicos en el diseño final [Autores].	86
Figura 4.3. Diseño final - vista frontal [Autores].	86
Figura 4.4. Diseño final - vista lateral [Autores].	87
Figura 4.5. Diseño final - vista posterior [Autores].	87
Figura 4.6. Conexiones de las salidas del servorail [Autores].	88
Figura 4.7. Autopiloto y cables dentro del fuselaje [Autores].	88
Figura 4.8. Canal de control de los modos de vuelo [Autores].	89
Figura 4.9. Movimiento del timón de dirección [Autores].	89
Figura 4.10. Movimiento del elevador [Autores].	90
Figura 4.11. Movimiento de los alerones [Autores].	90
Figura 4.12. Tilt rotors en modo QSTABILIZE [Autores].	90
Figura 4.13. Tilt rotors en modo FWBA [Autores].	91
Figura 4.14. Armado del autopiloto usando el control [Autores].	91
Figura 4.15. Aeronave en modo QSTABILIZE [Autores].	92
Figura 4.16. Aeronave en modo FWBA [Autores].	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Comparativa motores sin escobillas y con escobillas.	17
Tabla 2-2. Características de los filamentos [49, p. 83].	39
Tabla 3-1. Características de la impresora 3D Artillery Sidewinder X1 [58].	47
Tabla 3-2. Ficha técnica PIXHAWK PX4 2.4.8 [59, p. 2].	64
Tabla 3-3. Configuración por defecto de las salidas del Tricopter [64].	79
Tabla 3-4. Configuración de las salidas de los motores [Autores].	80
Tabla 3-5. PinOut de las salidas PWM del autopiloto [Autores].	82
Tabla 3-6. Parámetros de los motores y sistema tiltrotors.	84

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 2-1. Presión.....	5
Ecuación 2-2. Presión aerodinámica	6
Ecuación 2-3. Temperatura	6
Ecuación 2-4. Densidad.....	6
Ecuación 2-5. Viscosidad dinámica	7
Ecuación 2-6. Viscosidad cinemática.....	7
Ecuación 2-7. Conservación de la energía	7
Ecuación 2-8. Principio de Bernoulli	8
Ecuación 2-9. Número de Reynolds	8
Ecuación 2-10. Sustentación	9
Ecuación 2-11. Resistencia	10
Ecuación 2-12. Resistencia total.....	11
Ecuación 2-13. Factor de alargamiento según la cuerda.....	12
Ecuación 2-14. Factor de alargamiento según la superficie alar.....	12
Ecuación 2-15. Peso sobre superficie alar.....	12
Ecuación 2-16. Carga alar	13
Ecuación 2-17. Carga de potencia.....	13
Ecuación 2-18. Velocidad máxima motor eléctrico	21

CAPÍTULO I

1. DEFINICIÓN DE LA PROPUESTA

1.1. Introducción

La aeronáutica es una rama de la ciencia la cual permite ofrecer novedosas y eficientes soluciones a problemas cotidianos, actualmente es cada vez más común el uso de aeronaves, en especial las pequeñas como los drones. En este desarrollo tecnológico se plantea diseñar y realizar pruebas a una aeronave de tipo dron que permita realizar el reconocimiento de problemáticas de la agricultura de los principales productos de la región como el café, el plátano y el aguacate. Ya que en Colombia existe un gran rezago tecnológico dentro del campo, lo cual impide al país alcanzar altos niveles de productividad para cumplir con metas de exportación aprovechando los tratados de libre comercio. Los drones tienen el propósito de reemplazar labores humanas en el campo que pueden arriesgar la salud de las personas tales como los procesos de fumigación y aplicación de abonos. Pero también generar una relación directa entre tecnología y productividad, con tecnología que permita aplicar correctamente la agronomía de precisión en lugar de sistemas de producción obsoletos o que estén sobredimensionados [1].

Dentro de la agricultura de precisión el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) cumplen con una función primordial, como la vigilancia de los cultivos mediante visión artificial. Posteriormente se procesan los datos obtenidos y mediante el procesamiento digital de imágenes se pueden identificar plagas comunes y así detenerlas antes de que se propaguen a todo el cultivo.

1.2. Definición del problema

Colombia es tradicionalmente un país agrícola, sin embargo, existe un gran atraso en el sector rural en cuanto a la automatización y optimización de procesos. Según la Presidencia de la República “En el sector agrícola hay mucho potencial que aún no ha sido explotado, Colombia tiene 22 millones de hectáreas de potencial agrícola y sólo se están utilizando 8 millones” [2].

1.2.1. Planteamiento del problema

La situación socioeconómica de Latinoamérica y especialmente la de Colombia, no ha permitido a los pequeños campesinos y agricultores aprovechar mejor el mercado. Además de esto, aproximadamente un millón de hogares campesinos cuentan con menos tierra de la que tiene una vaca para pastar, es decir, menos de 0.05 kilómetros cuadrados [3]. Además, la falta de educación y conocimiento de nuevas tecnologías principalmente en las zonas rurales del país, dificultan el proceso de modernización en el campo. Uno de los factores como, por ejemplo: la topografía montañosa sobre la que se cultiva dificulta el uso maquinaria pesada para muchas labores, por lo que actividades como la fumigación y fertilización son hechas directamente por el ser humano. Esto generando múltiples consecuencias deteriorando físicamente la salud de quien realiza la labor, la exposición a

sustancias como abonos, fertilizantes e insecticidas además de los grades pesos a cargar en terrenos irregulares deterioran considerablemente a largo plazo los sistemas respiratorios, musculares y óseos.

Según declaraciones de la embajadora de la Unión Europea (UE) en Colombia, Patricia Llombart, la agricultura del eje cafetero debería ir más allá, debería haber una mayor diversificación y aplicación de la tecnología para que la agroindustria pueda ofrecer productos más elaborados y con mejores estándares de calidad con menores tiempos y costos de producción [4]. En un corto o mediano plazo maquinaria como los tractores o las avionetas podría llegar a ser reemplazada por los drones, especialmente en labores de fumigación, fertilización y monitorización de cultivos. No obstante, el costo de un dron no es para nada barato, ya que estos pueden rondar alrededor de los 23 mil dólares [5]. La falta de optimización de procesos en los cultivos como el de café no ha permitido incrementar las utilidades de los agricultores; además de que cada vez es más difícil conseguir mano de obra que quiera trabajar en el campo, este fenómeno ha venido incrementándose desde hace más de siete años ante las difíciles condiciones económicas y sociales de los recolectores [6].

1.2.2. Formulación del problema

¿Cómo podrían tecnificarse los procesos de los pequeños y medianos agricultores, aumentando así la productividad y competitividad? Además, ¿Cómo se podría generar una solución económicamente atractiva utilizando tecnología local?

1.2.3. Sistematización

¿Es posible tecnificar procesos en el campo utilizando algún tipo de aeronave, que a su vez permita reducir costos de producción y aumentar la productividad de los agricultores?

¿Qué técnicas se pueden utilizar en el desarrollo de una aeronave diferentes a las técnicas tradicionales como el uso de madera balsa; que sistemas deberían emplearse para su uso en zonas topográficas montañosas como las de Colombia?

¿Cómo se puede recrear y estudiar la interacción de la aeronave con el aire; de qué manera se puede validar la confiabilidad del diseño mecánico de la aeronave sin la necesidad de construir un prototipo?

1.3. Delimitación

La idea del proyecto es desarrollar un prototipo de un vehículo aéreo no tripulado (VANT), utilizando herramientas de diseño asistido por computador CAD (Computer Aided Design) para validar su funcionamiento mecánico mediante simulaciones. También se debe evaluar el óptimo desempeño aerodinámico de la aeronave mediante un software de mecánica de fluidos computacional CFD (Computational Fluid Design) para lograr una buena sustentación y un tiempo de vuelo mayor. Además de utilizar métodos de fabricación sencillos como la manufactura aditiva CAM (Computer Aided Manufacturing), más específicamente la impresión 3D.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un vehículo aéreo no tripulado con sistema de despegue y aterrizaje vertical utilizando tecnologías de manufactura aditiva para el sector agrícola.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar las características y los parámetros de la aeronave.
2. Validar el diseño del VANT con sistema VTOL.
3. Implementar a través de tecnologías de manufactura aditiva (impresión 3D).
4. Realizar pruebas del funcionamiento de los sistemas del aeromodelo a nivel de laboratorio.

1.5. Justificación

Tecnologías como la manufactura aditiva (impresión 3D) ayudan a agilizar procesos de producción y prototipado, una de las grandes ventajas que tiene la impresión 3D sobre técnicas tradicionales como el uso de madera balsa, es la facilidad para construir geometrías complejas. No obstante, para poder emplear esta tecnología se necesita de máquinas especializadas como lo es una impresora 3D, con la cual empleando conocimientos en manejo de software CAD (Computer Aided Design) y materiales usados en la impresión 3D (Filamentos), se obtienen piezas para ser dispuestas como prototipos o incluso como producto final. Una máquina de estas de gama de entrada puede costar alrededor de los trescientos dólares (\$300), lo cual no es precisamente barato, pero si ya se cuenta con una de estas previamente, la tecnología de impresión 3D resulta ser realmente asequible debido al bajo costo de la materia prima (Filamentos) y fácil acceso, comparado con otros procesos de manufactura de polímeros, como puede ser inyección polimérica.

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT), más conocidos por sus siglas en inglés UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), pueden ayudar a elevar de sobremanera rendimientos de producción agrícola entre un 25 a un 30 por ciento, lo cual los convierte en una opción ideal para múltiples procesos de tecnificación en el campo [5]. Por otra parte, los sistemas de despegue y aterrizaje vertical más conocidos por sus siglas en inglés VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*), tienen una gran utilidad para acceder a lugares de topografía montañosa, ya que evitan la necesidad de utilizar una pista para el despegue y aterrizaje de la aeronave. Los drones en el sector agrícola tienen un futuro asegurado, inclusive tienen un presente, pues en algunos países ya hace tiempo que operan en el campo. Y es que los drones ofrecen múltiples posibilidades para la agricultura. Pueden sobrevolar los campos de una forma rápida y captar información diversa gracias a sus sensores. Esto permite que aquellos que gestionan los cultivos tengan a su disposición una herramienta para controlar e incrementar la productividad [7].

En particular, lo que se plantea con este proyecto es desarrollar un VANT, esto debido a que el uso de vehículos aéreos se ha convertido en una alternativa viable

para labores convencionalmente realizadas directamente por los seres humanos tales como: vigilancia, fumigación y fertilización. De modo idéntico, se propone desarrollar un sistema VTOL que permita despegar la aeronave sin necesidad de pista. También se plantea hacer uso de la manufactura aditiva ya que se pueden implementar diseños que cumplan las características necesarias para el correcto funcionamiento de una aeronave tipo VTOL además de satisfacer la carencia en la producción y desarrollo de aeronaves tipo VANT, lo que va ligado a un avance en el desarrollo y la investigación de la aeronáutica utilizando estos aeromodelos para aplicaciones agrícolas.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA AERONAUTICA, LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS E IMPRESIÓN 3D

2.1. Generalidades de la aeronáutica

La aeronáutica es la ciencia que se encarga de analizar, diseñar y construir aparatos mecánicos con la capacidad de volar. Así mismo se encarga de las técnicas y normas que permiten un correcto desempeño de la aeronave, la aeronáutica engloba a la aerodinámica la cual estudia el comportamiento y movimiento del aire cuando se desplaza un objeto en su interior.

2.1.1. Aerodinámica

La aerodinámica la rama de la ciencia que más influye en el proceso de construcción de un vehículo aéreo tipo VANT, ya que es una rama de la mecánica de fluidos encargada de estudiar las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre estos y el fluido que los baña, siendo este último un gas (aire) y no un líquido. Optimizando un diseño óptimo para el sistema aerodinámico se puede lograr una buena sustentación con la más mínima resistencia. El sistema aerodinámico de una aeronave se realiza por medio de cálculos matemáticos mediante variables, para así analizar las fuerzas que actúan sobre él.

• Variables hidro-climatológicas

La hidroclimatología es la ciencia encargada de caracterizar las variables climáticas ligadas al ciclo del agua, esto va desde una escala detallada hasta una escala global. Las variables ligadas a la hidroclimatología son esenciales en la construcción de una aeronave debido a que pueden afectar el comportamiento y desempeño de esta. Algunas de las variables más importantes para tener en cuenta son:

Presión

Su definición es la derivada de la fuerza con respecto al área, no obstante, simplificando cuando la presión es normal y uniforme sobre la superficie, se puede escribir como se muestra en la Ecuación 2-1 como la fuerza sobre el área [8, p. 390].

$$P = \frac{F}{A}$$

Ecuación 2-1. Presión

Dónde:

P : presión (Pa)

F : fuerza (N)

A : área (m²)

Sin embargo, en la aerodinámica se suele utilizar la ecuación mostrada en la

$$P = P_o \cdot (1 - 0,0065 \cdot h)^{5,256}$$

Ecuación 2-2. Presión aerodinámica

Dónde:

P : presión (Pa)

P_o : presión estándar de 101300 (Pa)

h : altura (m)

Temperatura

La temperatura se puede considerar como la propiedad que determina si un objeto está en equilibrio térmico con otros objetos, dos objetos que estén en equilibrio térmico el uno con el otro estará a la misma temperatura. En sentido inverso se puede concluir que, si dos objetos tienen diferentes temperaturas no están en equilibrio térmico [8, p. 534]. Su unidad de medida es el Kelvin (K); la temperatura del ambiente puede influir en factores como la densidad del aire, por lo que es importante tenerla en cuenta para ciertos cálculos. Ver Ecuación 2-3.

$$T = T_o - \frac{9,5}{1000} \cdot h$$

Ecuación 2-3. Temperatura

Donde:

T : temperatura (K)

T_o : temperatura estándar de 273(K) mas 15°C

h : altura (m)

Densidad

La densidad de una sustancia se define como su masa por cada unidad de volumen [8, p. 13]. Ver Ecuación 2-4.

$$\rho = \frac{P}{287(T_o - 0,0065 \cdot h)}$$

Ecuación 2-4. Densidad

Donde:

ρ : densidad (Kg/m³)

P : presión (Pa)

T_o : temperatura estándar (K)

h : altura (m)

En la aeronáutica es importante conocer la densidad del aire, ya que dependiendo de esta puede aumentar o disminuir la fuerza de sustentación.

Viscosidad

La viscosidad es la propiedad de un fluido ya sea líquido o gaseoso a oponerse a un esfuerzo cortante cuando está en movimiento. La viscosidad en los líquidos tiene una relación inversa con la temperatura ya que mientras mayor sea la temperatura

menor será la viscosidad, mientras que en los gases aumenta la viscosidad con la temperatura [9].

Viscosidad dinámica:

es una constante representada por el símbolo “ μ ” y sus unidades están en Pascales segundos (Pa·s). Ver Ecuación 2-5.

$$\mu = \mu_o \cdot \frac{T_o + C_s}{T + C_s} \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{3/2}$$

Ecuación 2-5. Viscosidad dinámica

Donde:

μ : viscosidad dinámica (Pa·s)

μ_o : viscosidad dinámica estándar de $1,983 \times 10^{-5}$ (kg/m*s)

T_o : temperatura estándar (K)

T : temperatura (K)

C_s : constante de Sutherland de 120 (K)

Viscosidad cinemática:

esta no depende de las características dinámicas del fluido, se define como la viscosidad dinámica sobre la densidad. Ver Ecuación 2-6.

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Ecuación 2-6. Viscosidad cinemática

Donde:

v : viscosidad cinemática (m²/s)

μ : viscosidad dinámica (Pa·s)

ρ : densidad (Kg/m³)

• Demás variables físicas

Las demás variables físicas son fundamentales para entender porque vuelan las aeronaves, principios como el de la conservación de la energía y Bernoulli que explican físicamente porqué el perfil alar de las aeronaves permiten generar la fuerza de sustentación en las aeronaves.

Principio de la conservación de la energía

Un cuerpo en un sistema no aislado interactúa con varias fuerzas en el ambiente, la energía total está compuesta por varios tipos de trabajo. Para simplicidad de cálculos se ignora el trabajo hecho por ondas mecánicas, radiación electromagnética. transferencia de materia y eléctrica [8, p. 197]. Ver Ecuación 2-7.

$$E_T = E_C + E_{Pot} + E_{Presión} + U$$

Ecuación 2-7. Conservación de la energía

Donde:

E_T : energía total (J)
 E_C : energía cinética (J)
 E_{Pot} : energía potencial (J)
 $E_{Presión}$: energía de presión (J)
 U : energía interna (J)

Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli es el resultado de dividir la ecuación de la conservación de la energía (ver Ecuación 2-7) entre el volumen, luego se reorganizan los términos dando como resultado la Ecuación 2-8 [8, p. 403]. La ecuación de Bernoulli permite aplicar el principio de conservación de la energía a un fluido ideal, en el caso de la aeronáutica al aire en que fluye la aeronave. La ecuación de Bernoulli muestra como la presión de un fluido disminuye a medida que la rapidez del fluido aumenta.

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vec{v} + \rho \cdot g \cdot y = constante$$

Ecuación 2-8. Principio de Bernoulli

Donde:

P : presión (Pa)
 ρ : densidad (Kg/m³)
 \vec{v} : rapidez (m/s)
 g : gravedad (m/s²)
 y : altura (m)

Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado para determinar el comportamiento de un fluido, es decir, determinar si el fluido fluye de manera laminar o turbulenta. El flujo es laminar cuando se comporta de forma ordenada con trayectoria rectilínea y velocidad regular, en cambio el flujo turbulento es cuando el fluido se desplaza con cambios fluctuantes de velocidad y trayectoria irregular. De acuerdo con la siguiente ecuación se puede obtener el valor del número de Reynolds. Ver Ecuación 2-9 [10].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu}$$

Ecuación 2-9. Número de Reynolds

Dónde:

ρ : densidad a determinada altura (Kg/m³)
 v : velocidad crucero (m/s)
 c : cuerda media geométrica (m)
 μ : viscosidad dinámica (Pa·s)

• Fuerzas que experimenta la aeronave

Una aeronave experimenta cuatro fuerzas principales, las cuales son: sustentación (lift), peso (weight), empuje (thrust) y resistencia (drag). Ver Figura 2.1.

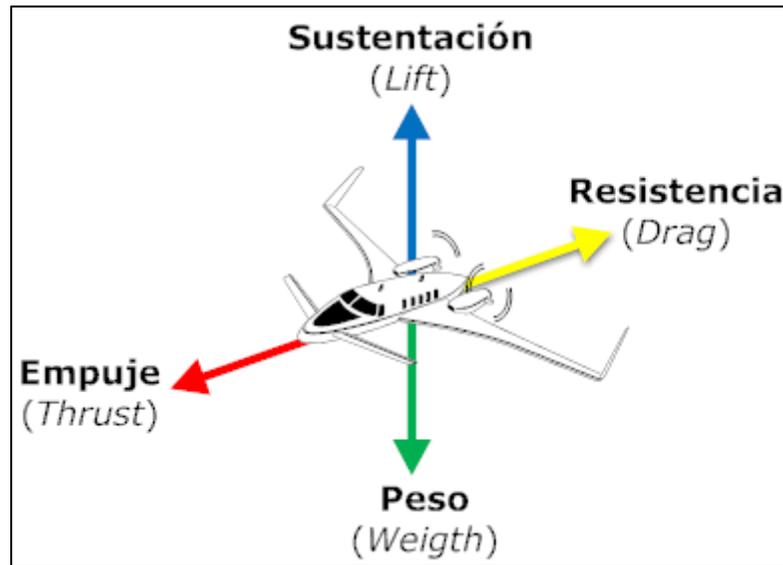


Figura 2.1. Fuerzas que experimenta la aeronave [11].

Sustentación (Lift)

La fuerza de sustentación es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, esta es perpendicular a la velocidad. En los VANT es muy importante ya que esta fuerza está en las alas y es la que permite que el avión pueda mantenerse en el aire. A continuación, con la Ecuación 2-10 podemos hallar el valor de la fuerza de sustentación (N) [12].

$$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S$$

Ecuación 2-10. Sustentación

Dónde:

L : fuerza de sustentación (N)

C_L : coeficiente de sustentación (adimensional)

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

v : velocidad (m/s^2)

S : superficie alar (m^2)

Peso (Weight)

La aeronave como cualquier cuerpo posee masa, por lo tanto, está sujeta a las fuerzas de atracción gravitacional. La dirección de la fuerza ejercida por el peso es siempre en dirección hacia el centro de la tierra, por lo que siempre tendrá su dirección hacia abajo en un diagrama de cuerpo libre.

Donde:

w : peso (N)

m : masa (kg)

g : gravedad (m/s^2)

El centro de masa de la aeronave es el punto donde se considera que se aplica toda la fuerza de gravedad, por lo cual es importante que este quede alineado con las alas las cuales generan la fuerza de sustentación.

Empuje (Trust)

La fuerza de empuje de una aeronave se obtiene mediante un motor donde la rotación de las hélices genera una fuerza propulsora, o en un reactor con la expulsión de los gases quemados dentro de la turbina. La fuerza del empuje la gran mayoría de las veces va en sentido de la punta de la aeronave, es decir hacia la punta. La fuerza de empuje es la potencia del motor, ya que a mayor potencia mayor es la aceleración y la velocidad que puede alcanzar.

Resistencia (Drag)

Dentro de un flujo de aire cualquier cuerpo sea o no uniforme, va a tener una resistencia al paso del aire (drag) la cual está relacionada directamente con la geometría del cuerpo. El flujo constante del aire desencadena en fuerzas de fricción y presión [13, p. 3]. En la Figura 2.2 se puede observar el comportamiento de la resistencia del aire.

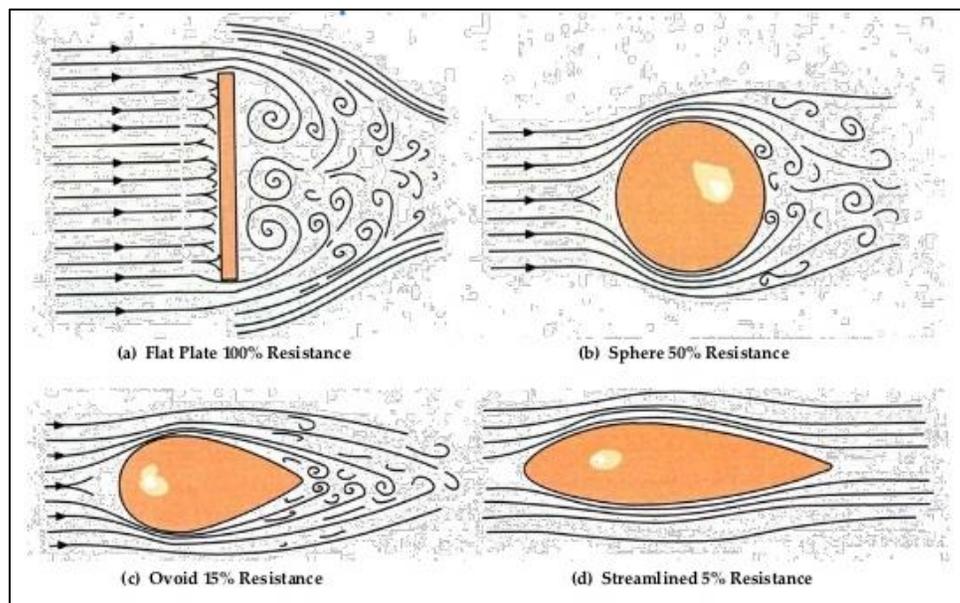


Figura 2.2. Efecto del flujo de aire sobre distintas superficies [14].

No obstante, en el caso de la aeronáutica la Resistencia o en ingles llamada Drag, es una fuerza que se opone al movimiento de la aeronave, por lo que su dirección es contraria a la del empuje [13, p. 26].

$$D = C_D \cdot q \cdot S$$

Ecuación 2-11. Resistencia

Donde:

D : resistencia o drag (N)

C_D : coeficiente de resistencia (adimensional)

q : presión dinámica (Pa)

S : superficie alar (m^2)

La resistencia total se descompone como la suma de la resistencia parásita y la resistencia inducida, la resistencia parásita creada por la resistencia de fricción y presión. Mientras que la resistencia inducida es generada por las alas y proviene del hecho que esté generando fuerza de sustentación.

$$D = D_p + D_i$$

Ecuación 2-12. Resistencia total

Donde:

D : resistencia (N)

D_p : resistencia parásita (N)

D_i : resistencia inducida (N)

• Variables en el diseño de la aeronave

Perfil alar

El perfil alar se define como el área transversal de un elemento, que al desplazarse a través de un fluido como lo es el aire su distribución sea capaz de crear una fuerza de sustentación. Las características geométricas de este mismo tienen un gran impacto en las características aerodinámicas, por lo que varias de estas características deben ser tomadas en cuenta en los cálculos de la aeronave.

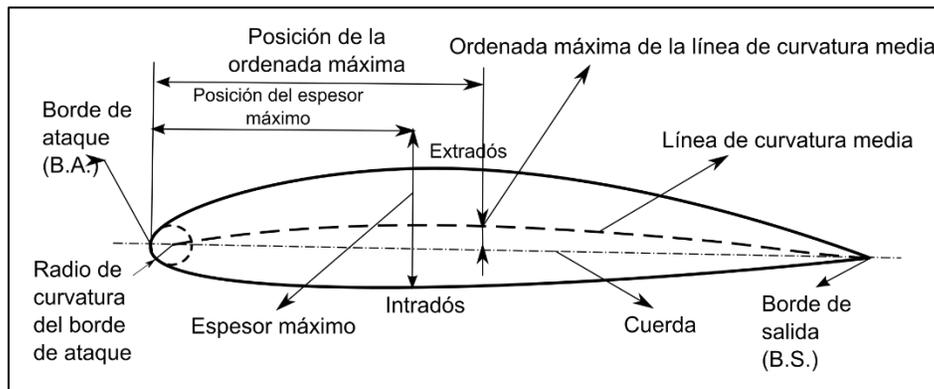


Figura 2.3. Partes de un perfil alar [15].

Según el principio de la conservación de la energía y el principio de Bernoulli, el flujo de entrada y salida de aire debe ser constante, por lo que gracias a la geometría del perfil alar el aire de la parte superior del perfil debe hacer un mayor recorrido en un el mismo tiempo que el aire en la parte inferior. Como se sabe que a mayor velocidad la presión disminuye. La diferencia de presiones y velocidades que se puede ver en la Figura 2.4, demuestra cómo es que se genera la fuerza de sustentación [13, p. 18].

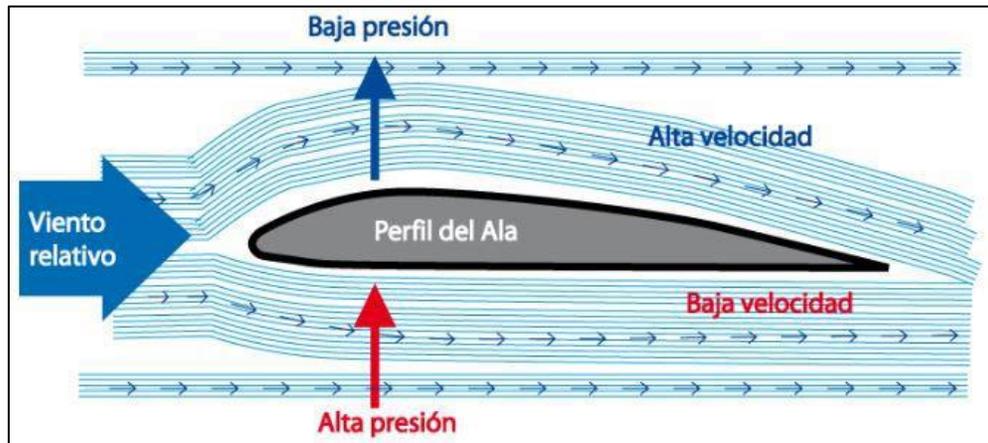


Figura 2.4. Sustentación en un perfil alar [13].

Factor de alargamiento

Los VANT generalmente utilizan alas trapezoidales, por lo tanto, tienen un factor de alargamiento. Usando las siguientes ecuaciones se puede hallar el valor de este factor, Ver Ecuación 2-13 y Ecuación 2-14 [16].

$$AR = \frac{b}{\hat{c}}$$

Ecuación 2-13. Factor de alargamiento según la cuerda

$$AR = \frac{b^2}{S}$$

Ecuación 2-14. Factor de alargamiento según la superficie alar

Dónde:

AR : factor de alargamiento (adimensional)

b : envergadura (m)

\hat{c} : cuerda media (m)

S : Superficie alar (m^2)

Carga alar

La carga alar se refiere al peso que soporta el ala medida en newton sobre la superficie alar medida en metros cuadrados (N/m^2) que es lo mismo que Pascal (Pa). Como la fuerza de sustentación es igual al peso, por lo tanto, se puede reescribir la Ecuación 2-15 para obtener así la carga alar [17]. Ver Ecuación 2-16.

$$w = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \rightarrow \frac{w}{S} = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Ecuación 2-15. Peso sobre superficie alar

$$C.A = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{w}{S}$$

Dónde:

$C.A$: carga alar (N/m^2) (Pa)

C_L : coeficiente de sustentación (adimensional)

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

v : velocidad (m/s)

w : peso (N)

S : superficie alar (m^2)

Carga de potencia

La carga alar es una relación entre la potencia del motor y el peso de la aeronave, se calcula con la Ecuación 2-17. En vuelo horizontal se tendrá una carga alar alta y una carga de potencia baja, mientras que en vuelo vertical se tendrá una carga alar baja y una carga de potencia alta.

$$CARGA DE POTENCIA = \frac{w}{P}$$

Ecuación 2-17. Carga de potencia

Donde:

$CARGA DE POTENCIA$: (Kg/W)

w : peso de la aeronave (Kg)

P : potencia del motor (W)

2.2. Los VANT y RPAS (drones)

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) conocidos popularmente como drone (en inglés zángano), los VANT surgieron principalmente para usos militares, aunque actualmente se puede denominar así a todo vehículo aéreo no tripulado con sistema de autopiloto. Sus funciones principales son cumplir con labores que pueden resultar dispendiosas que podrían poner en riesgo vidas humanas. En el ámbito militar se empezó a utilizar en labores de vigilancia y espionaje, posteriormente cuando la tecnología de los drones estaba suficientemente desarrollada entró al mercado para uso civil.

Las aeronaves controladas remotamente por sus siglas en inglés RPA (Remotely Piloted Aircraft) y sistemas aéreos no tripulados por sus siglas en inglés RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) que en diferencia a los RPA hace referencia a aeronaves que tengan sistemas adicionales como cámaras, sistemas de aspersión, entre otros [18].

2.2.1. Clasificación según el tipo de aplicación

Drones de uso civil A continuación, se mostrarán varios usos civiles de los drones actualmente:

- Vigilancia fronteriza
- Topografía

- Enlace de comunicaciones en uso satelital
- Manipulación de materiales nocivos
- Investigaciones biológicas
- Investigaciones arqueológicas
- Control de incendios forestales
- Detección de plagas e incendios
- Búsqueda de personas
- Ocio y entretenimiento
- Transporte de domicilios

Drones de uso militar A continuación, se mostrarán varios usos militares de los drones actualmente:

- Reconocimiento y espionaje
- Misiones de ataque (para esto son equipados con diferentes tipos de munición como misiles aire-tierra, misiles aire-aire o bombas teledirigidas, entre otros)
- Servir como señuelos en práctica de artillería

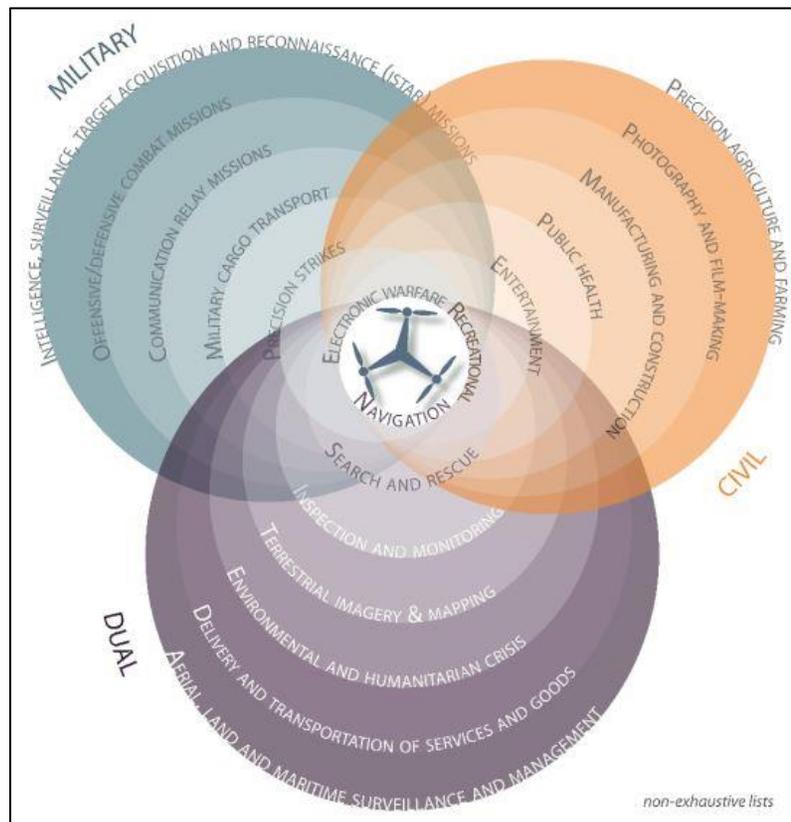


Figura 2.5. Clasificación de los usos de los drones [19].

2.2.2. Clasificación según la disposición del perfil alar

• Drones de ala fija

Sus características principales es que poseen una estructura simple la cual permite tener una eficiencia aerodinámica alta, esto permite hacer vuelos largos a una velocidad alta. El hecho de tener las alas fijas facilita planear en caso de que un motor falle y así llegar a salvo a un punto de aterrizaje, una de las grandes desventajas tiene que ver con las operaciones de despegue y aterrizaje ya que hay necesidad de una pista. En la Figura 2.6 se puede observar un dron de este tipo.



Figura 2.6. Ejemplo dron de ala fija [20].

• Drones de ala rotatoria

Este tipo de dron es el más extendido tanto a nivel profesional como de ocio, se caracterizan por tener varias hélices que rotan impulsadas por un motor y a cuyo conjunto de motor y hélice se le llama rotor. Por esto también son conocidos como *drones multirrotores*.

Se pueden clasificar según la cantidad de rotores: los tricópteros (3 rotores), cuadricópteros (4 rotores) los cuales son los más comunes en el mercado, hexacópteros (6 rotores) y octacópteros (8 rotores). Este tipo de aeronave posee un sistema de control de vuelo complejo, pues debe mantener sus hélices con diferentes velocidades y sentidos de giro para crear la fuerza de empuje necesaria para girar, elevarse o avanzar. En la se Figura 2.7 se puede observar un dron de este tipo.



Figura 2.7. Ejemplo dron de ala rotatoria [21].

- **Convertiplanos (Tiltrotors)**

Una aeronave con sistema tiltrotors combina la capacidad de elevación de un helicóptero con la velocidad y rango de un avión turbo propulsado. Sus dos motores los cuales se inclinan sobre las alas mueven los propulsores en oposición al movimiento de rotación del cuerpo. A continuación, en la Figura 2.8 se puede ver un convertiplano comercial de 6 a 9 pasajeros desarrollado por la empresa Bell Augusta.



Figura 2.8. Convertiplano Bell Augusta BA609 [22].

2.2.3. Componentes de un VANT

- **Motores**

Los motores son una de las partes más importantes de los drones, ya que tienen la función de hacer girar las hélices las cuales generan el impulso del dron. Los motores eléctricos pueden ser bifásicos, que además suelen ser motores con escobillas (*brushed*) o trifásicos que se usan en motores de mayor potencia y son motores sin escobillas (*brushless*).

Los motores *brushless* al no tener escobillas para el cambio de polaridad tiene algunas desventajas, como que se debe utilizar un sistema de control electrónico para llevarlo a cabo. Esto hace que de entrada los motores *brushless* sean más costosos, pero a largo plazo el casi nulo costo de mantenimiento los hace más rentables [23].

La principal diferencia entre un motor con escobillas y un motor sin escobillas es que este último en lugar de tener imanes estacionarios y bobinas giratorias, el motor sin escobillas tiene las bobinas estacionarias e imán giratorio. Esto hace que no se genere fricción, al ocurrir esto se reduce el calor y aumenta la eficiencia del motor.

En la siguiente tabla se resumen las ventajas y desventajas más relevantes de los motores con y sin escobillas.

Tabla 2-1. Comparativa motores sin escobillas y con escobillas.

	Motor sin escobillas	Motor con escobillas
Mantenimiento	Mínimo	Periódico
Velocidad máxima	Alta, sin limitaciones por componentes mecánicos	Baja, limitada por las escobillas
Componentes externos	Sistema de control electrónico complejo y costoso	Sistema de control simple y económico
Tamaño/Eficiencia	Mayor eficiencia con relación al tamaño	Menor eficiencia con relación al tamaño
Pérdidas	Muy pequeñas	Pequeñas (en forma de calor), debido al rozamiento de las escobillas
Vida útil	Mayor, desgaste mecánico casi nulo	Menor, desgaste mecánico por el rozamiento de las escobillas
Ruido eléctrico	Menor	Mayor, debido a los arcos eléctricos

Tal como se observa en la Tabla 2-1, el motor sin escobillas es superior en casi todos los aspectos excepto en cuanto a componentes externos, debido a que necesita de un sistema de control complejo y costoso. Como en este proyecto de grado solo se utilizarán los motores tipo *brushless* por lo que se profundizará más en este tipo de motores.

Principio de funcionamiento

El funcionamiento de estos motores es similar al de otros motores eléctricos, se energizan las bobinas para generar un campo electromagnético, este último tiene una interacción con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor. Los imanes del rotor intentan alinearse con las bobinas que están electrificadas, por lo que se energizan las bobinas que siguen y a las que estaban energizadas se dejan de energizar para que el rotor siga girando.

Partes y composición

Los motores eléctricos de tipo *brushless* están compuestos por un rotor formado por una serie de imanes permanentes y por un estator formado por una serie de bobinas, al tener imanes permanentes y un campo magnético constante no hay necesidad de un bobinado y escobillas para conducir la corriente al rotor. En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de un motor brushless.

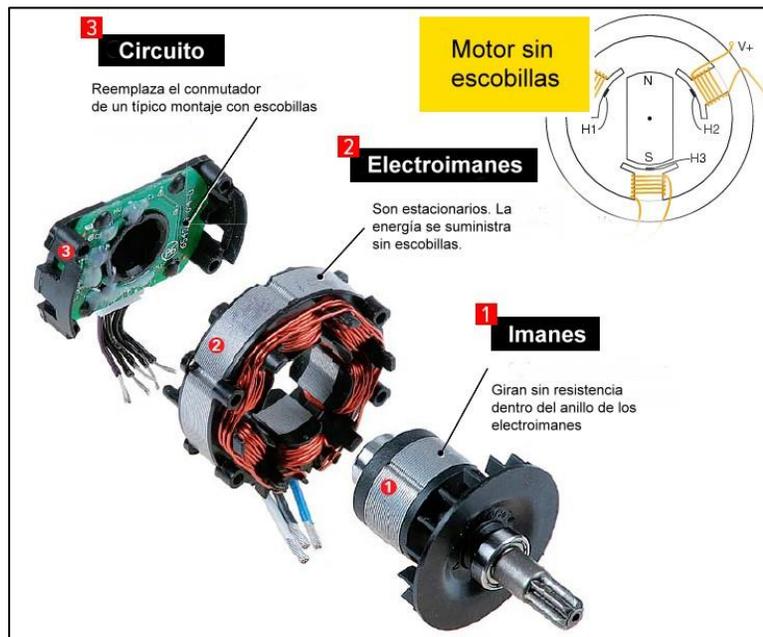


Figura 2.9. Diagrama motor brushless [24].

La mayoría de estos motores están compuestos por tres grandes bobinados conectados entre sí y pueden estar en forma de estrella o delta, según la forma en que están las bobinas se afecta el funcionamiento del motor. La organización en delta se aumentan las revoluciones por minuto del motor [RPM] y por tanto la potencia, en cambio la organización en estrella permite aumentar el par, por lo que esta forma es la más utilizada en los drones. El par indica la carga que es capaz de mover el motor, por lo que mientras más alto sea el par mejor será la dinámica del motor [25].

Disposición del rotor y estator

Existen variaciones en la disposición de los bobinados y los imanes [26, p. 14]:

Inrunner

Los imanes del rotor se sitúan en la parte interior del motor y el bobinado se encuentra en la parte exterior (en forma de delta) lo cual produce más revoluciones [RPM], pero a su vez entrega un par bajo. Por lo que estos tipos de motores se usan con hélices pequeñas y no con hélices grandes ya que no sería capaz de vencer la inercia y moverlas.

Outrunner

Los imanes del rotor se sitúan en la parte externa del motor, mientras que el bobinado se sitúa en la parte interna (en forma de estrella) lo cual produce más par y menos revoluciones [RPM], esto hace a los motores con esta disposición los mejores para drones con hélices grandes.

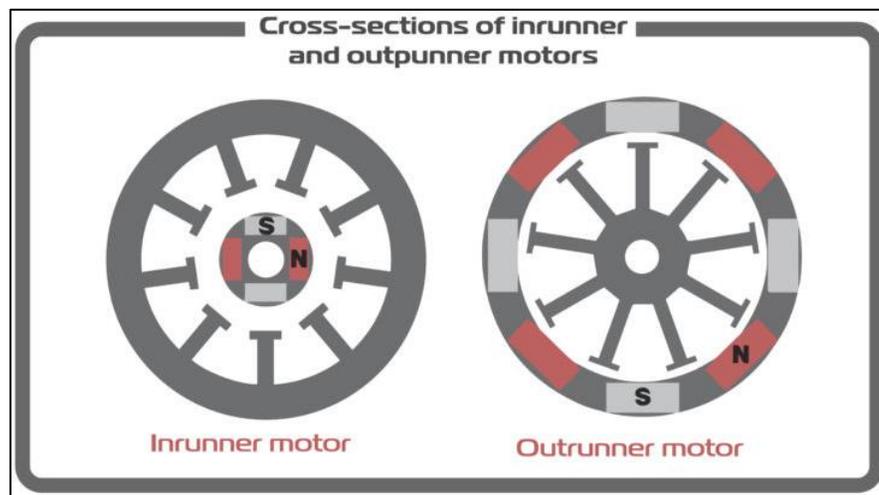


Figura 2.10. Motor brushless inrunner y outrunner [27].

• Batería

Las baterías son un parámetro importante para el óptimo vuelo de los drones, las baterías que usan los drones en la mayoría de las ocasiones son de tipo Li-Po (Polímero de litio). Estas baterías son las más utilizadas en los drones debido a su rápida capacidad de descarga necesaria para la alta corriente demandada por los motores, además de que tienen una mayor relación entre tamaño y eficiencia que otras tecnologías.

Estas baterías tienen una vida útil de aproximadamente quinientos ciclos, también son muy susceptibles a incendiarse o explotar debido a las grandes cantidades de energía que puede descargar en poco tiempo. Debido a esto se deben controlar diversas variables para evitar una sobre descarga o una sobre temperatura para evitar que se dañen. En su composición cada batería está compuesta por una o varias celdas de 3.7 volts [V] conectadas en serie [28]. En la Figura 2.11 se puede observar una de las baterías más comunes.



Figura 2.11. Batería tipo Li-Po [28].

• Hélices

Las hélices son una de las partes más importantes de los drones, ya que son las encargadas de convertir el movimiento generado por los motores en una fuerza de empuje. Es muy importante saber qué hélice elegir, ya que estas pueden variar dependiendo de la necesidad o del par que generan los motores. Existen hélices con un variado número de palas, pero comúnmente en el mercado se encuentran hélices de dos y tres palas. Ambas son igual de populares, las de tres palas se usan porque generan una respuesta más rápida para el piloto ya que tienen mayor área superficial. Por lo tanto, se obtiene mayor estabilidad y empuje, pero el inconveniente es que se genera un mayor consumo de corriente [29]. En la Figura 2.12 se pueden ver varios tipos de hélices.



Figura 2.12. Hélices [29].

Diámetro: Las hélices tienen distintas longitudes, la cual es el diámetro del círculo que genera cuando gira.

Paso: El paso en cambio se define como el avance que hace la hélice por cada rotación.

Por lo tanto, mientras mayor sea el paso o el diámetro mayor será el par y la corriente requerida para rotar, por lo que es importante elegir las hélices considerando la potencia de los motores y la capacidad de las baterías. La velocidad máxima teórica se calcula usando la Ecuación 2-18, aunque varios factores como la resistencia del aire o la reserva de potencia del controlador de vuelo puede disminuir la velocidad, en el caso de los quadcopter puede ser incluso hasta un 50% menos.

$$\vec{v}_{MaxT} = MaxRPM \cdot Paso \cdot 60$$

Ecuación 2-18. Velocidad máxima motor eléctrico

Donde:

\vec{v}_{MaxT} : velocidad máxima teórica (m/s)

$MaxRPM$: máximas revoluciones por minuto (rpm)

$Paso$: paso de la hélice (m)

• Controlador de Velocidad (Electronic Speed control)

Los controladores de velocidad electrónicos son unos sistemas capaces de definir la velocidad de giro de un motor sin escobillas (brushless), esto mediante modulación por ancho de pulsos. La selección de estos aparatos electrónicos se debe hacer base a ciertos criterios, pero el más importante es que tipo de batería se va a utilizar y cuál es la corriente máxima de los motores. Para una batería de tres celdas un controlador que soporte una corriente 12 (A) será más que suficiente, pero para una batería de cuatro celdas (4S) se deberían elegir como mínimo unos speed control que resistan al menos 20 (A).

Partes: dos cables para la alimentación desde la batería, tres cables de salida que van al motor, un conector de dos o tres cables que recibe los datos de movimiento del motor y el Speed Control que es la caja negra en la mitad del sistema. En la Figura 2.13 se muestra un ejemplo de estos.



Figura 2.13. Speed Control Little Bee 20 A de 4S [30].

- **Sistema de control de vuelo**

Los VANT tienen un sistema de control el cual se encarga de que la aeronave realice las instrucciones que le da el usuario según la necesidad, instrucciones tales como los desplazamientos y maniobras necesarias mientras la aeronave está en vuelo. Las instrucciones pueden ser dadas por el piloto desde tierra mediante un mando o siguiendo un plan de vuelo establecido.

Autopilotos

En la actualidad la mayoría de los drones son controlados de manera semiautónoma, estos drones tienen dificultades para garantizar su estabilidad en entornos agrícolas complejos. Por lo cual se ha vuelto una necesidad implementar sistemas de control con una alta estabilidad y fiabilidad para los drones agrícolas [31, p. 1].

Pixhawk

Los autopilotos de Pixhawk son de los más utilizados actualmente, esto debido a que poseen software de licencia abierta y por ello es conocido como el “Android” de la industria de los VANT. Estos autopilotos tienen un sistema de comunicación el cual permite ejecutar múltiples procesos en el mismo dispositivo, esto resulta particularmente útil en tareas como la fumigación ya que si el VANT posee un sistema de visión artificial puede identificar posibles plagas para luego fumigarlas.



Figura 2.14. Pixhawk 3DR [32].

ArduPilot

Los autopilotos de ArduPilot permiten la creación de vehículos aéreos no tripulados, autónomos y confiables. Su gran variedad de herramientas adaptables para casi cualquier vehículo y aplicación la convierten en una herramienta muy flexible en su uso. Como es un proyecto de software libre, que inclusive puede ser programado desde Arduino, está en constante evolución y posee una rápida retroalimentación por un gran número de usuarios de la comunidad [33].



Figura 2.15. Ardupilot Arducopter [33].

Microcontrolador

Es un circuito integrado de alta escala de integración que contiene la mayor parte de elementos dentro de un controlador, también contiene todos los componentes fundamentales de una computadora. Al tener muchas limitaciones se usan para controlar una sola tarea, por lo que en su memoria solo reside el algoritmo de dicha tarea. En sus líneas de entrada/salida se conectan los actuadores y sensores del dispositivo a controlar, por su reducido tamaño es muy común que estén integrados en el dispositivo que controlan [34, p. 1].

Algoritmo

Un algoritmo son un conjunto de instrucciones definidas y ordenadas con el fin de resolver un problema o realizar una tarea. Las tres partes de un algoritmo son la entrada (input) que es la información que se recolecta, el proceso (process) definido con el conjunto de instrucciones a realizar según los datos de entrada y la salida (output) como las instrucciones que se le dan a los actuadores para realizar una tarea [35].

Comunicación de datos

Para lograr que el dron cumpla con las tareas deseadas debe ejecutar haber una buena comunicación entre el piloto y el dron, esto se puede lograr de forma manual mientras vuela la aeronave o programando la aeronave desde tierra antes de que despegue [36].

Control manual

Este modo permite al piloto manejar completamente el dron, mediante los botones y palancas incorporados en el control puede hacer que la aeronave maniobre a su voluntad. No cualquiera puede manejar un UAV de esta manera, por lo que debe ser un piloto con alta pericia y certificado.

Control automático

Este modo de control permite que el UAV pueda realizar de manera completamente autónoma todas las actividades que se le programen, esto sin la necesidad de un piloto. Esto se logra gracias a un sistema de autopiloto, el cual permite programar las acciones que deberá realizar el dron para completar las actividades. Las acciones van desde seguir puntos de ruta, realizar despegues y aterrizajes hasta maniobras de vuelo estacionario o en círculos alrededor de un punto, entre otros.

2.3. Diseño asistido por computador (CAD)

El diseño asistido por computador más conocido por sus siglas en inglés CAD (Computer Aided Design), consiste en el uso de software especializado para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas en dos o tres dimensiones (2D o 3D). Es una de las herramientas más importantes en el diseño de productos actualmente, además de que permite estimar la vida útil de un producto. En la ingeniería el CAD permite analizar estructura y ensamblajes, por lo que permite reducir la cantidad de prototipos físicos necesarios. Varias mejoras que el CAD permite son [37]:

- Reducir los costos de producción
- Asegurar la calidad del producto
- Reducir el tiempo de desarrollo
- Mejorar la productividad

Con el uso de estos softwares se pueden implementar varios sistemas de fabricación como la manufactura aditiva tal como impresión 3D o la manufactura extractiva como el uso de tornos CNC.

Algunos de los softwares CAD profesionales más populares son:

2.3.1. Solidworks

Este software es uno de los más populares del mercado y es desarrollado por la empresa francesa Dassault Systemès. Utiliza un diseño paramétrico el cual genera tres tipos de archivos: pieza, ensamblaje y dibujo. Una de sus mayores ventajas en comparación con otros software CAD es que ofrece curvaturas muy detalladas a diferencia de otros software CAD que imitan curvas con estructuras planas ligeramente inclinadas. Además, posee herramientas como diseño de la cubierta, simulación, cálculo de costes, comprobaciones de posibilidades de fabricación, CAM (Computer Aided Manufacturing), diseño sostenible y gestión de datos.

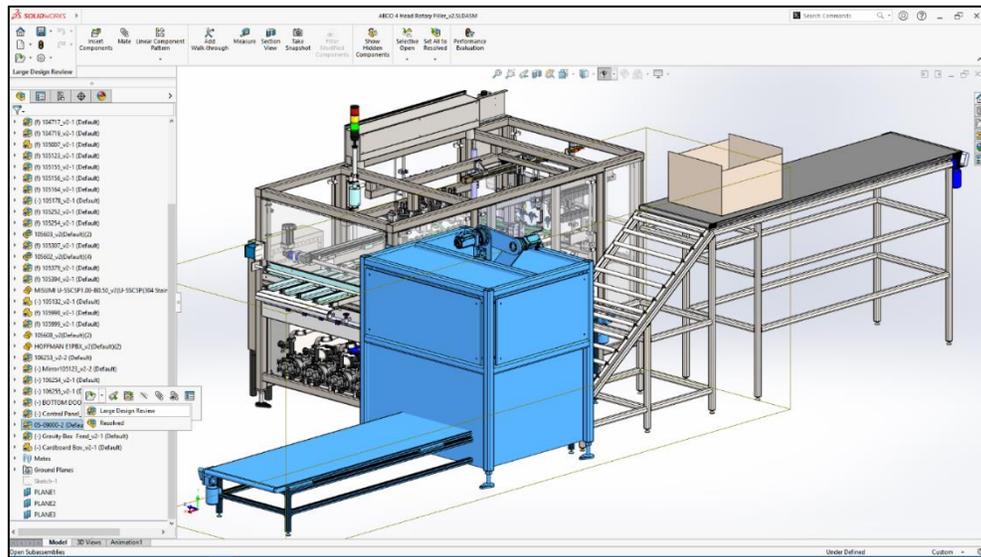


Figura 2.16. Ensamblaje de una máquina en SolidWorks [38].

2.3.2. Inventor

Este software CAD es desarrollado por la empresa estadounidense Autodesk, es un software especializado en el diseño mecánico y orientado en consecuencia como herramienta profesional para el diseño 3D, la documentación y simulación de productos. Inventor es un software que mezcla funciones de diseño paramétricas, directas, de forma libre y basadas en reglas, además de proporcionar al usuario herramientas integradas en el diseño de chapas, bastidores, tubos y energía. Varias de las ventajas de este software son la automatización del diseño gracias a la herramienta iLogic y el intercambio de ideas en un servicio seguro basado en la nube.

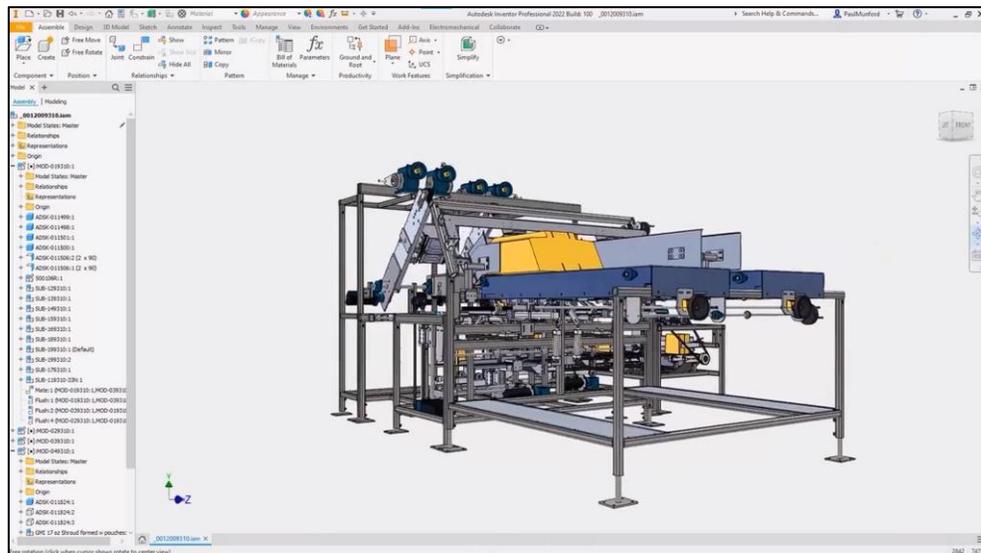


Figura 2.17. Ensamblaje de una máquina en Inventor [39].

2.3.3. CATIA

CATIA es la solución líder en todo el mundo para la experiencia y diseño de productos, ofreciendo la posibilidad de modelar cualquier producto. Por lo cual es ideal para ser utilizado por arquitectos de sistemas, ingenieros, diseñadores, profesionales en construcción y todos sus colaboradores. CATIA se basa en la plataforma 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes, por lo que posee múltiples ventajas tales como: diseño simultáneo en tiempo real, colaboración de todas las partes interesadas incluyendo a los trabajadores móviles. Otra de sus características valiosas es reutilizar componentes y conjuntos de proyectos más antiguos.

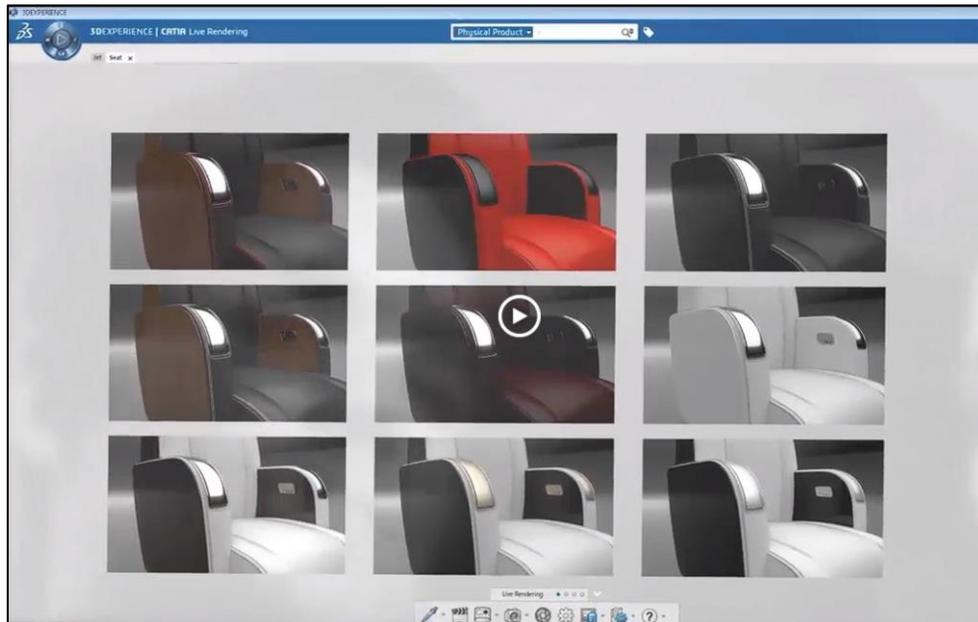


Figura 2.18. Múltiples estilos de una silla diseñada en CATIA [40].

2.3.4. Fusion 360

Este software desarrollado por Autodesk consiste en una plataforma basada en la nube, se utiliza principalmente para diseño y modelado 3D, CAD, CAM, y PCB. Su arquitectura basada en la nube permite que equipos de trabajo con múltiples colaboradores puedan trabajar en proyectos complejos a la vez, incluye herramientas de simulación y diseño generativo. Una de sus ventajas para impresión 3D es que puede exportar archivos en formato STL y OBJ.

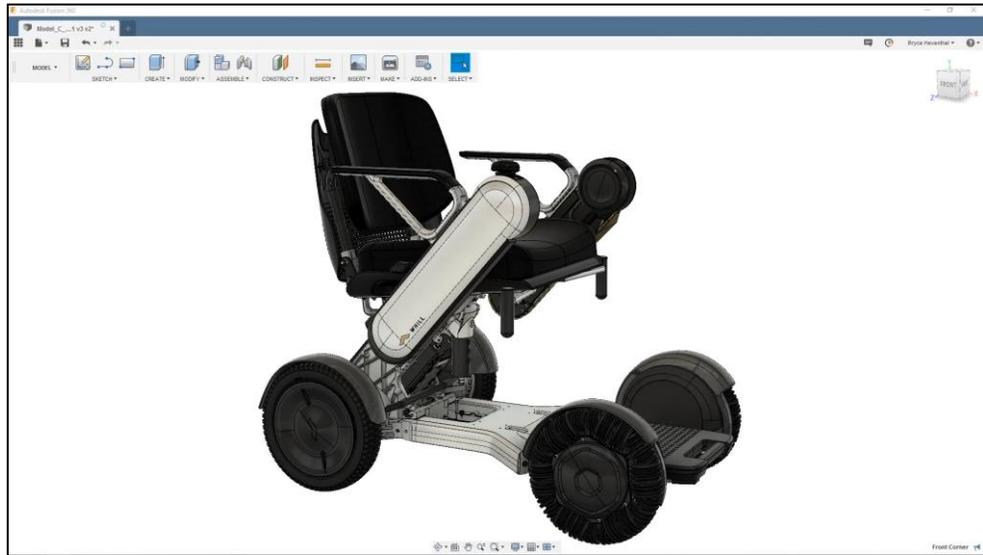


Figura 2.19. Diseño de un carrito en Fusion 360 [41].

2.4. Manufactura aditiva (MA)

La manufactura aditiva es el término formal que ha sido usado para llamar al prototipado rápido y que popularmente es conocido como impresión 3D, el término de prototipado rápido es usado en múltiples industrias para describir el proceso de rápida creación de una pieza antes de finalizar una realización o comercialización [42, p. 1].

2.4.1. Orígenes

En 1984, Charles 'Chuck' Hull cofundador de 3D Systems inventa la estereolitografía (proceso en el cual un fotorolímico líquido es solidificado capa por capa). No obstante, los primeros registros oficiales sobre orígenes de la impresión 3D datan de 1986, cuando fue aprobada una licencia para una máquina de estereolitografía. Ver Figura 2.20.

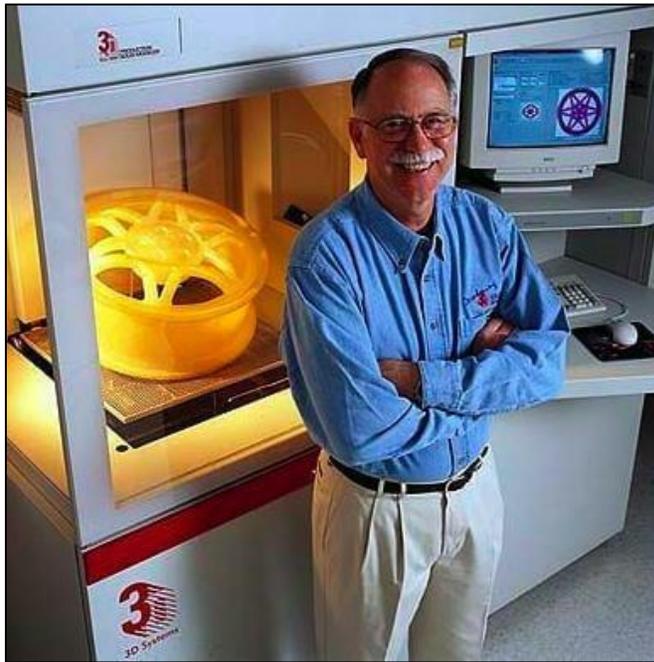


Figura 2.20. Charles 'Chuck' Hull inventor de la estereolitografía [43].

La primera máquina de estereolitografía comercializada fue la "SLA-1", la cual inventada por Charles 'Chuck' Hull en 1987 y se encuentra exhibida en el "National Inventors Hall of Fame" en Virginia, USA. Ver Figura 2.21.



Figura 2.21. Máquina de estereolitografía SLA-1 [44, p. 7].

2.4.2. Clasificación de los procesos de MA

Existen numerosas maneras de clasificar las tecnologías de MA, una de las maneras más populares de realizar esta clasificación es en base a la tecnología de extrusión utilizada y al tipo de tecnología de la impresora. Otro parámetro es clasificar en base a la materia prima que utiliza la impresora, aunque este parámetro puede resultar agrupando igualmente varias tecnologías como se muestra a continuación en la Figura 2.22.

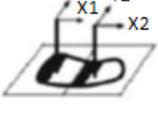
	Canal 1D 	Canales 2x1D 	Arreglo Canales de 1D 	Canal 2D 
Polimero líquido	SLA	Haz dual SLA	Objeto	Envisiontec MicroTEC
Partículas discretas	SLS, LST, LENS Phenix, SDM	LST	Impresión 3D	DPS
Material fundido	FDM, Solidscape		Termojet	
Hojas sólidas	Sólido PLT			

Figura 2.22. Clasificación de los procesos de manufactura aditiva [42, p. 30].

En algunas ocasiones puede resultar difícil elegir entre las distintas soluciones de impresión 3D, por lo que se debe decidir que materiales se pueden utilizar según la aplicación y los costes. Por ello a continuación se profundizará más en las tres tecnologías predominantes actualmente en la impresión 3D [45].

• FDM (Fused Deposition Modeling)

El modelado por deposición fundida es la forma más común de impresión 3D, ya que está fomentada por la aparición de las impresoras 3D para aficionados. Este tipo de impresión consiste en derretir y extrudir un filamento termoplástico que un extrusor deposita capa por capa en el área designada de impresión. Los termoplásticos que han sido estandarizados para estos tipos de impresoras son el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el ácido poliláctico (PLA) y sus diversas mezclas.

Esta técnica de impresión es utilizada principalmente para modelos básicos de prueba, así como para creación de prototipos rápidos y de bajo coste. Un ejemplo son las piezas que podría recibir un posterior proceso de mecanizado.



Figura 2.23. Modelado por deposición fundida [45].

La impresión FDM es una técnica que ofrece una menor resolución y precisión en comparación con la SLA y el SLS, no es la mejor opción para imprimir diseños complejos. Las piezas realizadas con FDM suelen tener líneas de capas visibles y/o mostrar imprecisiones alrededor de zonas complejas, esto comúnmente es solucionado mediante procesos de pulido químicos y mecánicos para obtener un mejor acabado.

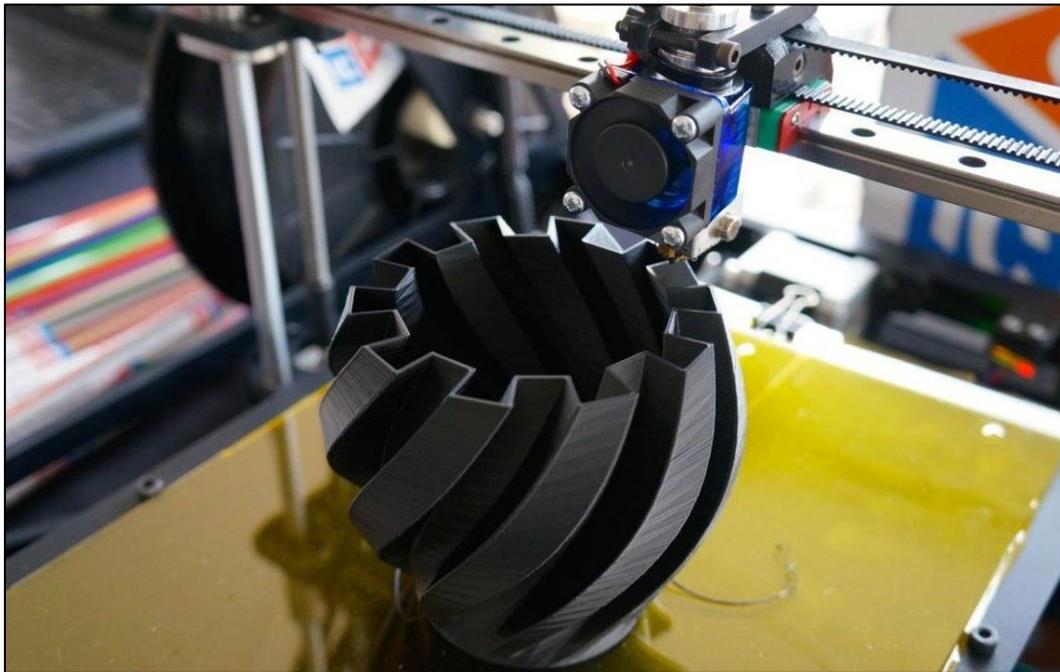


Figura 2.24. Impresora 3D FDM [46].

• **SLA (Stereolithography)**

La impresión por estereolitografía utiliza un láser, el cual ingresa dentro de un recipiente con una resina líquida fotosensible. Cuando el láser incide con un haz de luz UV sobre la resina esta se solidifica convirtiéndose en plástico endurecido mediante un proceso llamado fotopolimerización. Las piezas creadas utilizando SLA

ofrecen una gran resolución y precisión, por lo cual brindan un acabado muy liso y detallado en la superficie. Actualmente existe una gran variedad de resinas fotopolimerizables con distintas propiedades ópticas, mecánicas y térmicas capaces de igualar termoplásticos estándar, industriales o de ingeniería.



Figura 2.25. Estereolitografía [45].

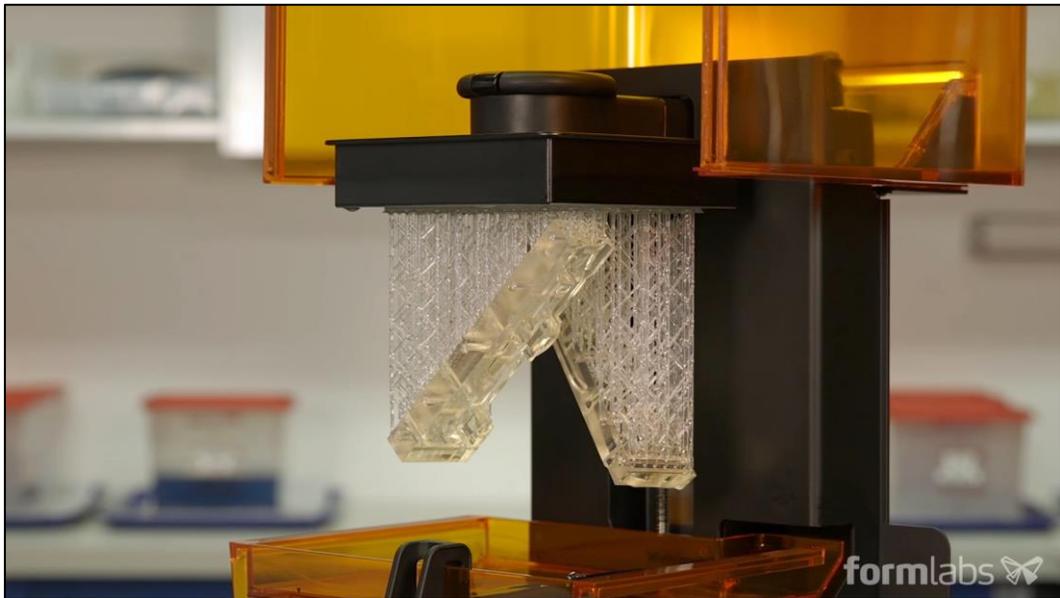


Figura 2.26. Impresora 3D SLA [45].

La impresión SLA es una excelente opción para prototipos que necesitan un alto nivel de detalle, escasa tolerancia, superficies lisas como moldes, patrones y piezas funcionales. Caso contrario a lo que ocurre con la FDM que es una tecnología que tiene dificultades con piezas de diseños complejos o con detalles intrínsecos. Ver Figura 2.27.

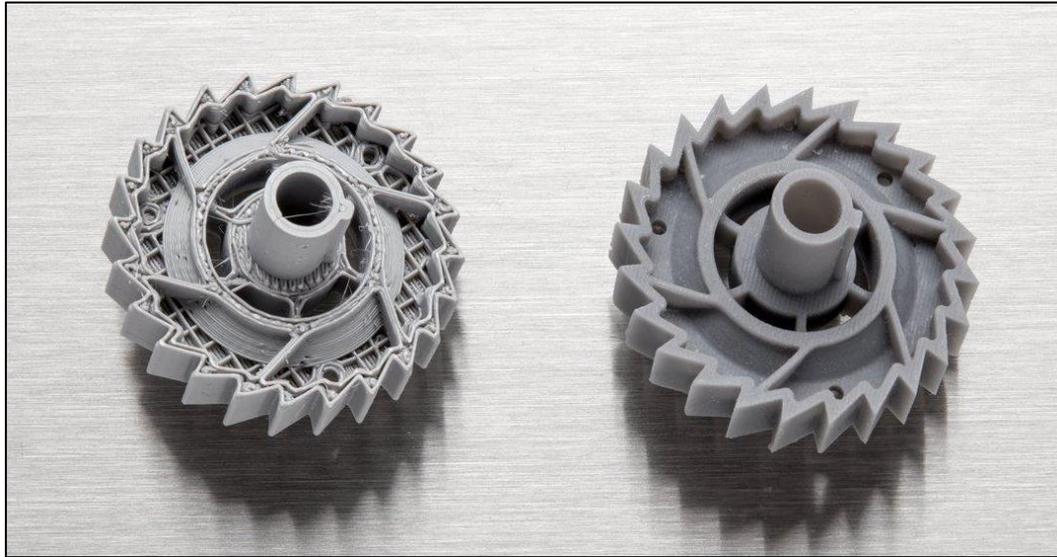


Figura 2.27. Comparación pieza FDM (izquierda) vs SLA (derecha) [45].

• **SLS (Selective Laser Sintering)**

El sinterizado selectivo por láser es la técnica de impresión 3D más común para aplicaciones industriales. El funcionamiento de estas impresoras se basa en un compartimiento donde se encuentra la materia prima, el cual es plástico en polvo. Luego un láser de alta potencia es proyectado sobre el material y lo funde al impactar con el material, después de terminar una capa se vuelve a cubrir otra capa con el polvo y se repite este proceso hasta que finalice la pieza y todas las capas se hayan solidificado.



Figura 2.28. Sinterizado selectivo por láser [45].

El polvo sin fundir sirve como soporte para la pieza durante la impresión y elimina la necesidad de agregar estructuras de soporte, lo cual es una gran ventaja en comparación con la impresión FDM. Esto hace que la impresión SLS sea óptima

para construir geometrías complejas como relieves interiores, socavados, paredes delgadas y deprimidos.



Figura 2.29. Impresión 3D SLS [47].

Las piezas realizadas con SLS tienen excelentes características mecánicas con una resistencia similar a la de piezas moldeadas por inyección, aunque las piezas realizadas con SLS tienen un acabado ligeramente rugoso como se puede ver en la Figura 2.30. El material más comúnmente utilizado es el nailon, ya que este termoplástico cuenta con excelentes propiedades mecánicas, es ligero, flexible, resistente, además de estable frente a impactos, sustancias químicas, la temperatura, la luz UV, el agua y la suciedad. Este tipo de impresión es ideal para fabricación limitada o el lanzamiento rápido de productos.



Figura 2.30. Superficie de pieza impresa con SLS [45].

2.4.3. Proceso general

La manufactura aditiva involucra múltiples pasos que van desde la virtualidad del diseño CAD hasta la construcción física de la pieza. Diferentes productos requieren diferentes tipos de procesos y postprocesos, mientras más grande y complejo sea el producto se pueden llegar a requerir numerosas etapas e iteraciones durante el desarrollo [42, p. 4].

- **Paso 1: CAD**

Todas las piezas realizadas mediante manufactura aditiva deben empezar desde un modelo hecho por software que describa la geometría externa de la pieza. Casi siempre se utiliza algún software CAD profesional, aunque el modelo 3D o la superficie geométrica también puede ser creado utilizando ingeniería inversa como son los escáner ópticos y láser.

- **Paso 2: Conversión a STL**

La extensión de archivos STL (Standard Triangle Language o STereoLithograpy) es la más comúnmente utilizada y la que se ha convertido de facto en el estándar, prácticamente todos los softwares CAD pueden exportar archivos en este formato. Este formato describe las superficies externas de los modelos CAD mediante formas básicas de cálculo por trozos.

- **Paso 3: Manipulación del archivo STL y transferencia a la máquina de MA**

El archivo STL debe ser transferido al software que controle la máquina de MA, una vez en el software se pueden manipular variables de la pieza como la escala, posición y orientación para su construcción.

- **Paso 4: Configuración de la máquina**

La máquina de MA debe ser configurada adecuadamente para un correcto proceso de construcción, variables como la fuente de energía, el grosor de las capas y del extrusor, temperatura de la cama y del extrusor, los tiempos, entre otros.

- **Paso 5: Construcción**

El proceso de construcción es realizado automáticamente prácticamente en su totalidad por la máquina de MA. Uno de los momentos que deberían ser revisados es la primera capa de la impresión para asegurarse de que la impresión se adhiere correctamente a la cama de la maquina y asegurarse de que la maquina no se quede sin material.

- **Paso 6: Remoción**

Una vez la maquina haya completado la construcción la parte debe ser removida. Esto requiere de interacción con la máquina, por lo cual hay que asegurarse de que la temperatura de la maquina haya disminuido para evitar quemaduras.

- **Paso 7: Post procesado**

Una vez removida la pieza esta puede requerir de una limpieza adicional, aunque esta ya estaría lista para su uso. En esta etapa las partes quizás sean débiles o tienen soportes que deben ser removidos, este proceso usualmente requiere tiempo y cuidado ya que necesita de manipulación manual.

- **Paso 8: Aplicación**

Las partes ahora deberían estar listas para su uso. Sin embargo, quizás requieran tratamiento adicional antes de su uso final. Por ejemplo, pueden aplicarse revestimientos de laca o pintura para obtener una superficie mejor texturizada. Estos tratamientos pueden ser laboriosos y largos si el tratamiento final es muy demandante, sobre todo si se requiere hacer ensamblajes con otros componentes mecánicos o electrónicos para obtener el producto final.

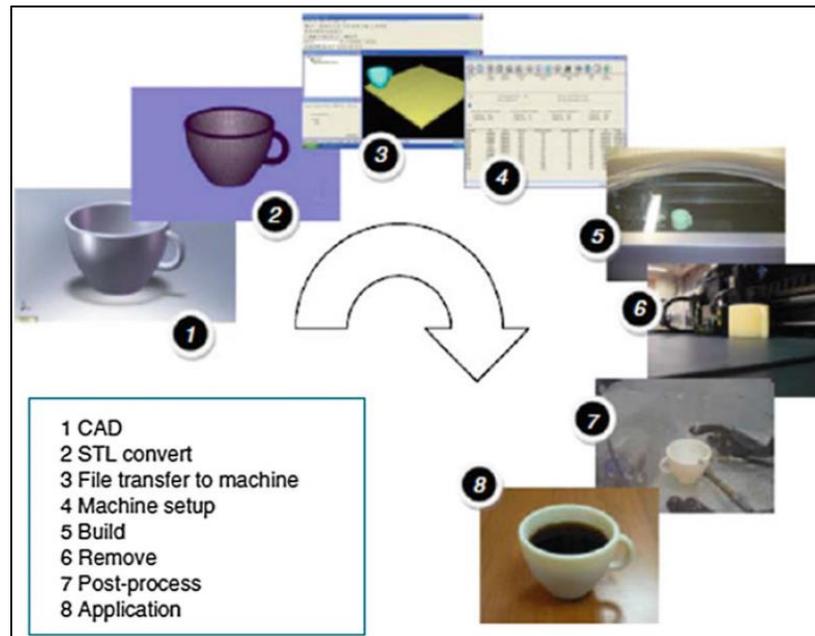


Figura 2.31. Pasos genéricos en la construcción de una pieza con MA [42, p. 5].

2.4.4. Slicer 3D

Un Slicer 3D o en español “Software de laminado” es un programa de corte 3D que funciona como intermediario entre el modelo 3D y la impresora. Mas detalladamente el funcionamiento del Slicer prepara el modelo seleccionado y genera un archivo en formato código G (.gcode) que es un lenguaje de programación de control numérico muy extendido. Existen múltiples Slicer 3D en el mercado, muchos de ellos son gratuitos y de código abierto [48]. A continuación, se mostrarán algunos de los Slicer 3D más populares:

- **Cura**

Este slicer fue desarrollado por la empresa de impresoras 3D Ultimaker en conjunto con su comunidad de usuarios con la cual también se encarga de su alojamiento y mantenimiento. Este slicer es un programa gratuito y de código abierto desde su creación, que además tiene añadidos perfiles de distintas impresoras 3D de diferentes marcas. Es compatible con archivos STL, 3MF y OBJ que pueden ser reparados por el slicer en caso de ser necesario. Su interfaz de usuario es ideal para usuarios principiantes y semiprofesionales, ver Figura 2.32.

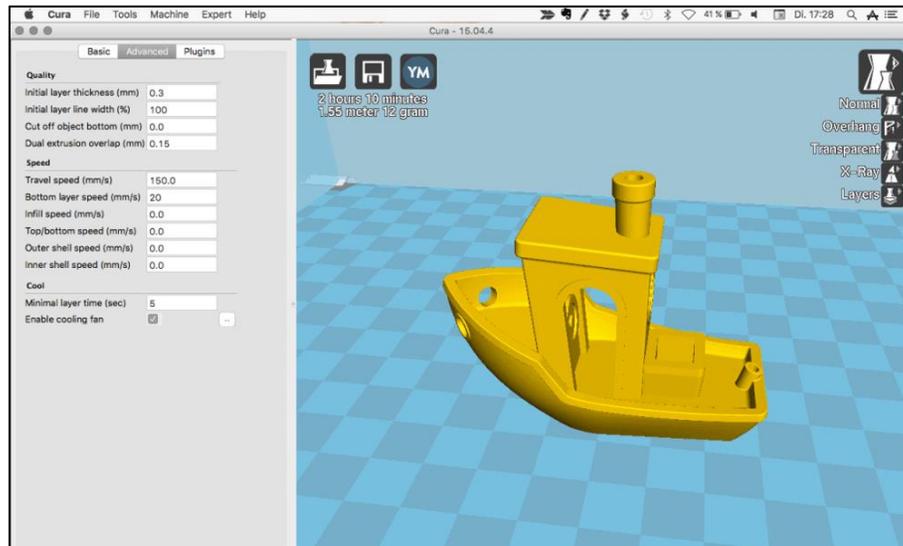


Figura 2.32. Interfaz de usuario software Cura [48].

• Simplify3D

Simplify3D es un slicer para profesionales, el cual es compatible con casi todas las impresoras 3D del mercado. Este software permite importar, escalar, rotar y reparar modelos 3D al antojo del usuario, la importación de archivos STL, OBJ y 3MF es bastante rápida y muestra incluso los modelos mas grandes. El programa incluye múltiples ajustes de configuración como: extrusores, control de capas, métodos de relleno, temperatura y refrigeración, además de permitir editar código G y scripts. Este slicer es de pago y tiene un costo de alrededor de los \$150 dólares, es ideal para quienes quieran obtener impresiones de alta calidad, aunque se debe tener algo de experiencia en impresión 3D para manejar su interfaz. Ver Figura 2.33.

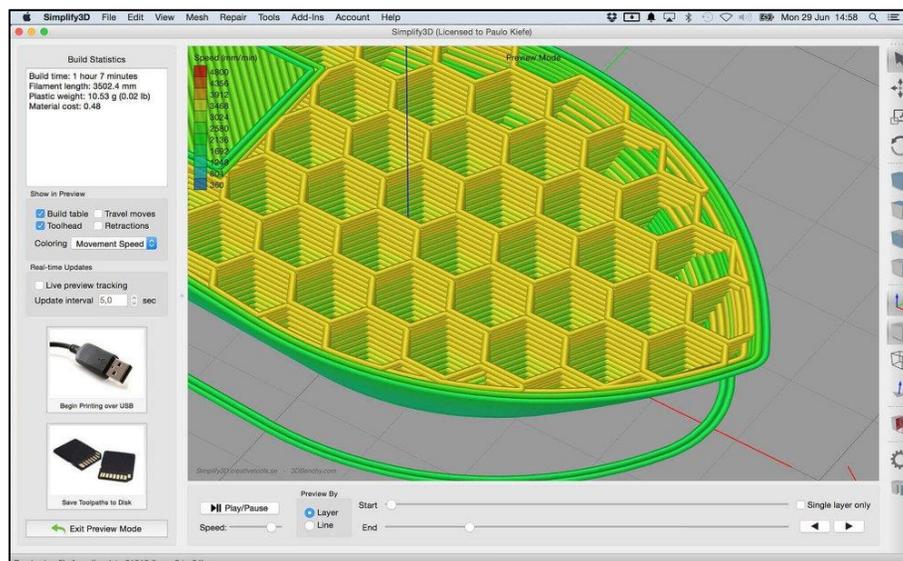


Figura 2.33. Interfaz de usuario software Simplify 3D [48].

- **Slic3r**

Slic3r es un programa de código abierto especialmente conocido por integrar características de nivel avanzado que no se encuentran en otros programas. Este programa es el pionero en múltiples funciones que se han convertido en un estándar, tales como los extrusores múltiples, las microcapas, altura de capas variable, la impresión secuencial, relleno de panal de abeja, entre otros. Este programa es ideal para expertos y profesionales en la impresión 3D, ya que su gran cantidad de funciones en su interfaz pueden llegar a confundir a los usuarios más novatos, ver Figura 2.34.

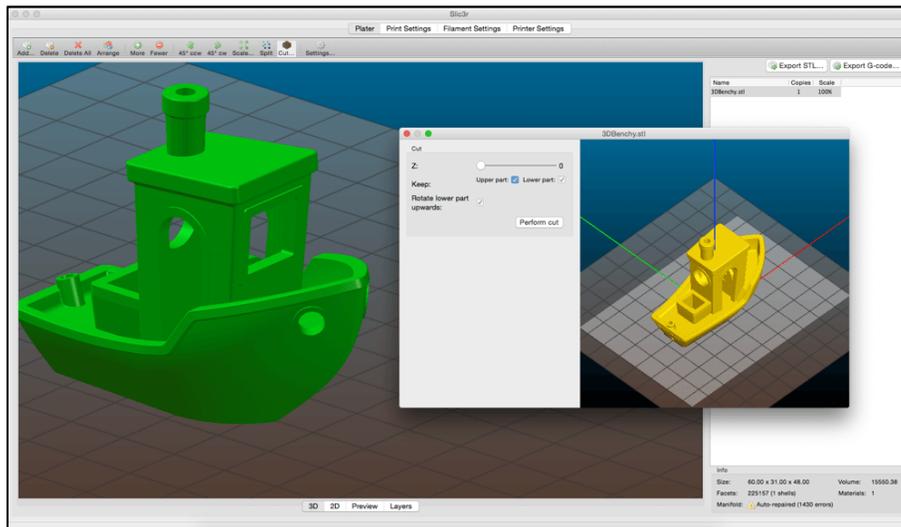


Figura 2.34. Interfaz de usuario software Slic3r [48].

2.4.5. Parámetros de impresión

Durante el proceso de fabricación de las piezas se pueden llegar a presentar múltiples problemas, ya que existen múltiples parámetros que deben ser configurados dependiendo el tipo de impresión que se va a utilizar y el tipo de material que se va a elegir. Muchos de estos parámetros actualmente son proporcionados por los fabricantes y otros han sido probados por la experiencia de la comunidad con este tipo de tecnologías, así minimizando los errores y fallos que puedan llegar a presentarse. A continuación, se mencionarán múltiples de los parámetros más importantes.

- **Temperatura**

Cada material tiene un rango de temperatura ideal para ser extruido, la temperatura del extrusor afecta la fluidez del material. A mayor temperatura mayor la fluidez del material, no obstante, demasiada fluidez puede provocar que el material se deslice más de lo deseado y que la capa pierda consistencia, incluso puede llegar a quemar y evaporar el material, además el calor del extrusor puede incluso deformar el material ya depositado en la pieza. Así mismo es importante ajustar en un rango

ideal la temperatura de la cama de la impresora, los valores recomendados pueden verse en la Tabla 2-2.

- **Velocidad**

La velocidad con la cual se mueve el cabezal de la impresora tiene un efecto directo en la capacidad de producción de la máquina, este parámetro depende de la impresora y está relacionado directamente con la capacidad de los motores. También depende del material que se vaya a utilizar, ver la Tabla 2-2.

- **Materiales**

La selección del material es importante, ya que es elegido dependiendo de la necesidad del usuario. En la impresión 3D por FDM los más comunes son el PLA y el ABS, mientras que con otras técnicas de impresión lo que más se ven son elastómeros o materiales como el nylon.

Tabla 2-2. Características de los filamentos [49, p. 83].

Material	Temperatura de impresión (°C)	Temperatura de la cama (°C)	Velocidad
PLA	210	60 Sin calentar/cinta azul	Normal Normal
ABS	240	115	Normal
Nylon 618	240	Sin calentar/garolita	Normal
HIPS	240	115	Normal
Elastómero	210-255	Sin calentar/cinta azul, vidrio desnudo	Muy lento
PET	Nominalmente 212-224; Algunos usuarios recomiendan 250	80	Lento
Polycarbonato	>270	Muy alta	Varias

Ácido Poliláctico (PLA)

El PLA es uno de los materiales más comunes para la impresión 3D, especialmente para la de tipo de impresoras FDM. Típicamente es hecho a base de maíz o materiales renovables similares y que son biodegradables. Puede ser extruido a una temperatura relativamente baja (alrededor de 210°C), no requiere que se caliente la cama de la impresora si se utiliza cinta azul, de lo contrario la temperatura de la cama debe ser de 60°C.

Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

El ABS es otro material común para la impresión FDM, es utilizado para múltiples juguetes plásticos (incluyendo piezas de Lego). Es un plástico duro y duradero, se mantiene fuerte a altas temperaturas, característica que el PLA no posee. No obstante, puede llegar a deformarse cuando se enfría y es muy difícil imprimirlo sin

una cama caliente, la temperatura recomendada para el extrusor es de 240°C y la de la cama es de 115°C.

Nylon

El nylon es un material muy versátil, ya que puede ser muy flexible en estructuras finas, pero en estructuras robustas puede ser bastante rígido y resistente. Este material es utilizado muchas veces en la fase de producto final y no solo en la fase de prototipo, sin embargo, se debe ser muy cauteloso con los puntos concentradores de esfuerzos. Este material es propenso a absorber humedad del aire, por lo que debe almacenarse en un lugar seco. Las presentaciones más comunes son el nylon 618 y el 645 (el número se refiere a la estructura molecular). Su temperatura de extrusión es de alrededor de 240°C, la cama debe estar sin calentar y si es posible que sea de garolita.

• Borde

Un borde es una capa que funciona como extensión de la pieza, va adherida a la pieza en la primera capa y va hasta el final de la impresión. El borde es usualmente especificado en términos de la anchura respecto a la pieza, unos pocos milímetros pueden representar una gran diferencia y estabilizar muy bien la pieza.



Figura 2.35. Pieza de impresión 3D con borde [49].

• Altura de la capa

Las impresoras 3D van poniendo cada capa una por una en paralelo a la cama, en la mayoría de los casos el extrusor y cabezal sube una vez completada cada capa. Usualmente se considera a los dos ejes de la plataforma o cama como x , y , mientras que la altura es el eje vertical z . La altura de la capa tiene efecto directo en la estética de la pieza, puesto que mientras más alta sea la capa, menos detallado será el acabado de la pieza. El extrusor nunca deja el material perfectamente redondo, por lo que el acabado será un poco rugoso sin acercarse a las técnicas como el fundido de plástico. También la altura de la capa afecta a la velocidad de la impresión, si las

capas son muy delgadas deberán imprimirse muchas capas, mientras que las capas más gruesas requieren de menos. Esto se traslada al tiempo de impresión, por lo que mientras menos capas haya más rápida será la impresión.

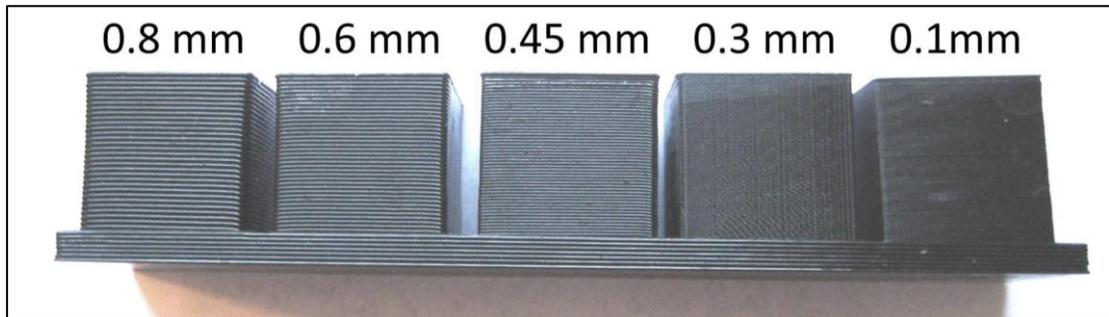


Figura 2.36. Altura de capas impresión FDM [50].

• Relleno

Usualmente en la fabricación de piezas 3D no se quieren crear objetos sólidos, ya que esto utiliza mucho filamento. No obstante, las piezas tampoco pueden estar vacías, por lo que la mayoría de slicers 3D crean un soporte interno llamado relleno. Existen múltiples tipos de relleno, como el de enjambre, concéntrico y el rectilíneo. Todos ellos ayudan a reducir el encogimiento, problema que es recurrente en el moldeado por inyección.

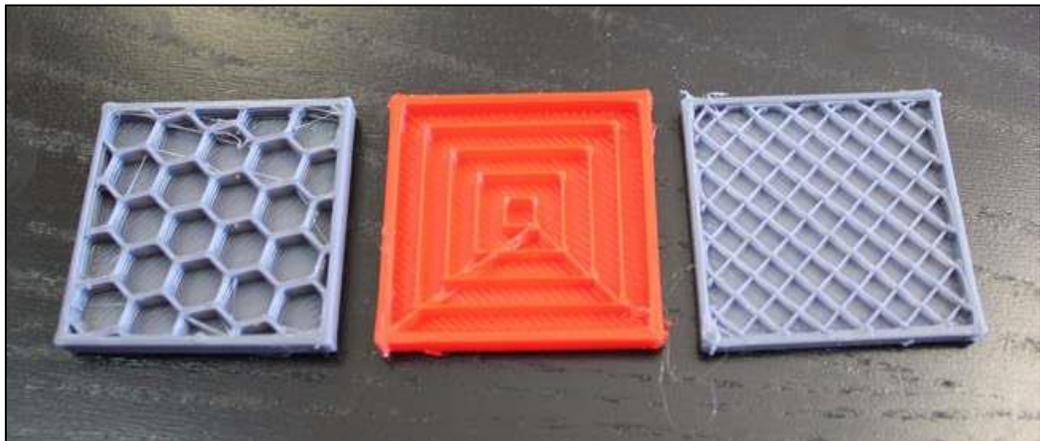


Figura 2.37. Diferentes tipos de relleno: panal de abejas, concéntrico y rectilíneo [49, p. 59].

El relleno se especifica en porcentaje de relleno, un relleno del 20% significa que un 20% del volumen interior estará ocupado por material, mientras que el 80% restante estará vacío. El relleno de panal de abeja es el más común de todos los tipos de relleno, ya que proporciona una estructura fuerte y no requiere de un gran uso de material.

2.4.6. La MA en la aeronáutica

La industria de la aviación fue una de las primeras industrias en adoptar la impresión 3D, si bien inicialmente fue utilizada en la creación de prototipos, posteriormente se hizo cada vez más común para producir piezas de uso final. La impresión 3D permite crear piezas con geometrías complejas que no serían posibles mediante métodos de fabricación tradicionales. Este método de fabricación permite crear piezas ligeras y sólidas, cubriendo una necesidad fundamental en la aeronáutica de tener piezas resistentes y livianas.

El uso de la manufactura aditiva es muy rentable en una relación costo beneficio para los fabricantes, ya que ayuda a los fabricantes a ahorrar mucho tiempo y dinero. Además, se han empezado a utilizar distintos materiales que se adaptan a las necesidades del fabricante y de la aeronave [51].

- **Cerámicos**

El uso de los materiales cerámicos en la aeronáutica no ha hecho mas que crecer, una empresa que ha estado implementando estos materiales es la empresa ANYWAVES, que se dedica a la construcción de satélites, apoyados por el fabricante francés 3DCeram con el objetivo de optimizar el diseño y reducir el peso de las piezas. Han desarrollado un nuevo concepto de antena cerámica que consiga mejorar el rendimiento de la radiofrecuencia.

- **Compuestos**

Los materiales compuestos con refuerzo interno de fibra se han vuelto mucho mas accesibles con la impresión 3D que con la fabricación tradicional, el fabricante estadounidense Markforged ha desarrollado múltiples piezas con esta tecnología. Donde se pueden encontrar como ejemplo un utillaje de medición de control de fugas en el tren de aterrizaje o una llave hexagonal personalizada para el rotor principal de un helicóptero, ver Figura 2.38.



Figura 2.38. Llave hexagonal impresa con Onyx [51].

El material utilizado para la impresión de las piezas fue el Onyx, conocido por incluir micropartículas de carbono que proporcionan una mayor dureza y resistencia mecánica.

- **Metales**

La impresión 3D para permitir la unión de estructuras metálicas y la reparación de piezas a gran escala es una tecnología que ha entrado pisando fuerte, el fabricante hispano-estadounidense Meltio es un gran exponente de estas tecnologías. Meltio ha desarrollado múltiples piezas, tales como una boquilla de sección transversal, un núcleo de molde o un montaje de motor, tal como se puede ver en la Figura 2.39. Estos tres modelos fueron fabricados en acero inoxidable, así como titanio en el caso del motor, el uso de esta tecnología logro reducir considerablemente el peso final de las piezas (0.79 kg, 6.59 kg y 0.5 kg).



Figura 2.39. Piezas impresas en metal [51].

CAPITULO III

3. DISEÑO DE LA AERONAVE

3.1. Antecedentes de los drones

Los drones parecen ser un invento de las últimas décadas, sin embargo, sus inicios se remontan hasta la primera guerra mundial donde fueron utilizados con fines militares. No obstante, su diseño se ha mejorado en los últimos tiempos, así llegando a convertirse en uno de los artefactos más útiles e interesantes.

El primer quadcopter o dron del mundo fue creado en 1907 por los hermanos inventores Jacques y Louis Bréguet, quienes trabajaron con el controvertido ganador del Premio Nobel, el profesor Charles Richet [52]. Para el año 1917 el Ruston Proctor Aerial Target se convirtió en la primera aeronave no tripulada de la historia, controlada por la tecnología RC (Control Remoto) inventada por Nikola Tesla. En la década de los 60's con el "boom" de la tecnología de los transistores, trajo en consecuencia la reducción del costo de los componentes electrónicos utilizados para el control por radio. Los aviones controlados a por RC empezaron a ganar popularidad en el mercado, finalmente en 2006 la FFA (Federal Aviation Administration) eliminó varias regulaciones para los UAV. Esta medida abrió nuevas posibilidades para las empresas y trabajadores independientes en diferentes industrias.

3.1.1. Antecedentes internacionales

La investigación de los VTOL ha sido una apuesta importante en el sector de la aeronáutica, detrás de la investigación hay grandes empresas como Uber, Boeing, Dufour Aerospace, etc. Para Airbus el futuro de las ciudades es implementar taxis voladores, la filial Vahana encargada del desarrollo ha realizado al menos 50 pruebas de prototipos a escala completa.

• A3 Vahana

El proyecto insignia de los VTOL para Airbus es el A³ Vahana el cual tiene un sistema de 8 hélices eléctricas las cuales pueden girarse para transformar el movimiento de vertical a horizontal. Ha sido capaz de llegar a los 92 km/h. En la Figura 3.1 se puede observar este prototipo [53].



Figura 3.1. Prototipo de Airbus A3 Vahana [53].

- **Airbus THOR**

En el año 2016, la empresa francesa Airbus presentó públicamente el primer aeroplano en el mundo construido en impresión 3D. Este modelo fue nombrado THOR por sus siglas en inglés (Testing High-Tech Objectives in Reality), que en español se traduce como (Prueba de Objetivos de Alta tecnología en la Realidad). Esta aeronave no tripulada tiene una longitud de 4 metros y una envergadura de 4 metros, las únicas partes de la aeronave que no fueron fabricadas en impresión 3D son el sistema eléctrico, la batería y las ruedas de aterrizaje. El resto de la aeronave está conformada por alrededor de 50 piezas de impresión 3D, el peso de la aeronave es de aproximadamente 25 kilogramos y en su primer vuelo logró recorrer una distancia de 40 kilómetros [54].



Figura 3.2. Airbus THOR [54].

3.1.2. Antecedentes nacionales

Actualmente en Colombia la regulación las aeronaves está estipulada por la Aeronáutica Civil, mediante la Resolución No. 04201 del 27 de diciembre de 2018 se regula el uso de las aeronaves no tripuladas.

La Resolución No. 04201 del 27 de Diciembre de 2018, tiene como propósito ampliar la información e impartir instrucciones de cumplimiento en referencia a los requisitos de Aeronavegabilidad y Operaciones necesarios para inscripción de explotadores, operadores y equipos, y para solicitar permiso para realizar vuelos de UAS, de acuerdo a lo establecido en el apéndice 13 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC 91), en lo relacionado con la realización de operaciones de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia - RPAS en Colombia [55].

En el país los drones tradicionalmente han sido utilizados para toma de imágenes, aunque actualmente está siendo utilizada por empresas como Geosystem y AeroScanTech para riego y fumigación. Los drones se han convertido en una herramienta cada vez más empleada en la agricultura, esto debido a la gran eficiencia y precisión que estos tienen ya que ahorran entre un 70 y 80%, que a la final esto se traduce en un gran ahorro económico para los productores [56].

• Coelum

El UAV Coelum es una aeronave 100% fabricada en Colombia, esta aeronave fue diseñada por la CIAC (Corporación de la Industria Aeronáutica de Colombia). Esta aeronave fue puesta a prueba para cumplir misiones del tipo ISR con el objetivo de que pueda ser adquirido por las fuerzas armadas colombianas, siendo destinado a labores de vigilancia y reconocimiento aéreo en instalaciones militares [57].

Algunas de sus características más importantes son:

- Autonomía de 60 minutos
- Longitud de 1,3 m y envergadura de 1,95 m
- Detección diurna en un rango de 2,9 km y nocturna de 0,64 km
- Velocidad crucero de 20 m/s
- Peso con carga de 5,5 kg



Figura 3.3. UAV Coelum fabricado por la CIAC [57].

3.2. Características de las piezas

Para todo el proceso de diseño para la impresión se utilizó el software Autodesk Inventor, en el cual se implementan características como vaciado y superficies de encaje por contacto que facilitan y aseguran el ensamblaje. Se eligió el software de Autodesk Inventor por su gran ventaja que da una licencia a estudiantes y docentes, la cual permite el uso de todas las herramientas y funciones.

La impresora utilizada en el proceso de construcción ha sido una Artillery Sidewinder X1, la cual cuenta con las características mostradas en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Características de la impresora 3D Artillery Sidewinder X1 [58].

Volumen de trabajo	300x300x400mm // 11,8x11,8x15,75"
Capa de resolución	0,1mm-0,35mm
Construir la velocidad	60 mm/s-150 mm/s
Velocidad	250 mm/s
La superficie de impresión	Cerámica de vidrio
Cama de calor tipo	AC cama de calor
Número de extrusores	1
Diámetro de filamento	1,75mm
Materiales aceptados	PLA ABS PLA Flexible madera PVA las caderas
Características especiales	N/A
Sensores avanzados	
Calibración	Manual
La tecnología de impresión	FDM
De tipo de extrusor	De tipo de extrusor
XYZ resolución	0.05mm, 0.05mm, 0.1mm
Tipo de boquilla	Volcano
Diámetro de la boquilla	0,4mm
Temperatura de la boquilla	180°C-240°C
Tiempo calentamiento de la boquilla	<3 minutos
Tiempo de calentamiento de la cama	80C en menos de 2 minutos
Sonido de funcionamiento	<70dBA

Consumo de energía	100-240 V600 W máx. (con cama calentada encendida)
Controlador	MKS Gen L (controlador paso a paso intercambiable)
Peso del producto	14 kg
Dimensiones del producto	550x460x650mm

3.3. Creación de las piezas

Para el proceso de impresión de las piezas se tienen en cuenta los pasos explicados más atrás en la página 34 en el título Proceso general, con especial cuidado en los siguientes puntos:

- Adaptación de la pieza: En este paso se busca ir modificando el modelo en secciones que puedan ser impresas ya que el tamaño es un factor para tener en cuenta por el volumen de trabajo de la impresora.
- Preparación en el Slicer: En este paso se exporta la pieza diseñada a formato STL para que pueda ser leído por el Slicer. Posteriormente se configuran los parámetros más importantes como la velocidad de impresión y la temperatura de la cama y el extrusor, estructura de relleno, entre otros.
- Impresión de la pieza: En este paso se imprime la pieza por FDM, en nuestro caso se toman en cuenta recomendaciones como utilizar laca para el cabello en aerosol en la cama de la impresora para una mejor adhesión de las piezas y aislar térmicamente la impresora dentro de una caja de acrílicos para que se conserve mejor el calor y así evitar pequeñas imperfecciones en la pieza.

A continuación, se describen las características de las piezas y su adaptación del diseño en el software de diseño CAD.

3.3.1. Alas

Para la fabricación de las alas estas han sido divididas en 2 partes, ya que así caben dentro del volumen de trabajo de la impresora 3D. El ala tiene un perfil alar NACA 0012, por lo cual es un perfil simétrico. Las alas tienen una forma trapezoidal, lo que quiere decir que la cuerda en un extremo es más larga cerca al fuselaje y es más corta llegando al final del ala.

• Raíz del ala

Un primer parte del ala va acoplada al fuselaje y en el otro extremo de la pieza hay una pequeña sección de un centímetro de profundidad en el cual el grosor interior es menor para que encaje el otro extremo de la otra mitad del ala. En la superficie inferior del ala va un agujero el cual está diseñado para que se inserte el servomotor que moverá los alerones. Ver Figura 3.4.



Figura 3.4. Raíz del ala - vista isométrica intradós [Autores].

En la parte trasera del ala, cerca del borde de salida hay unas pequeñas ranuras las cuales sirven para unir mediante bisagras el ala con el alerón. Ver

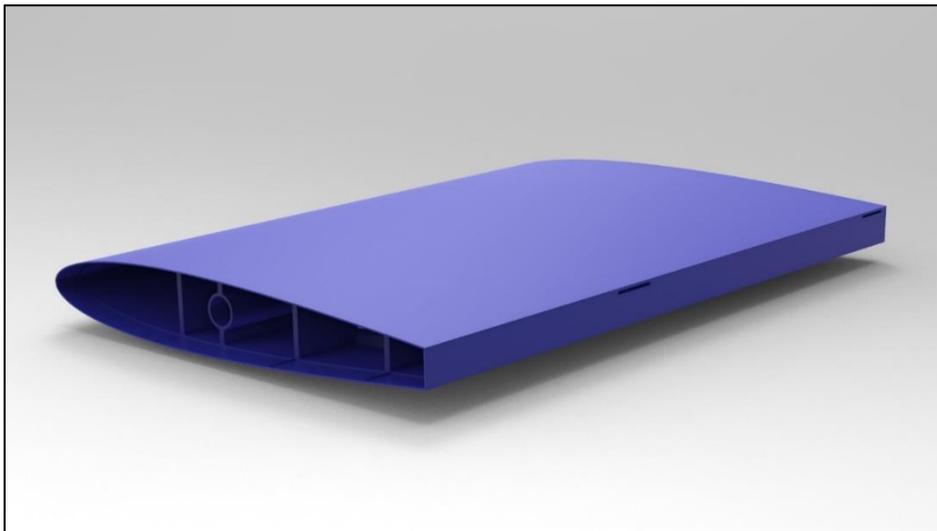


Figura 3.5. Raíz del ala - vista isométrica borde de salida [Autores].

- **Extensión del ala**

Para esta pieza se diseña un acople que permite que la raíz del ala encaje dentro de la pieza para dar así una mayor rigidez al ensamble, además se hacen soportes en medio para dar una mayor rigidez al ala y dejar espacio por donde pueda pasar el cableado. Ver Figura 3.6.

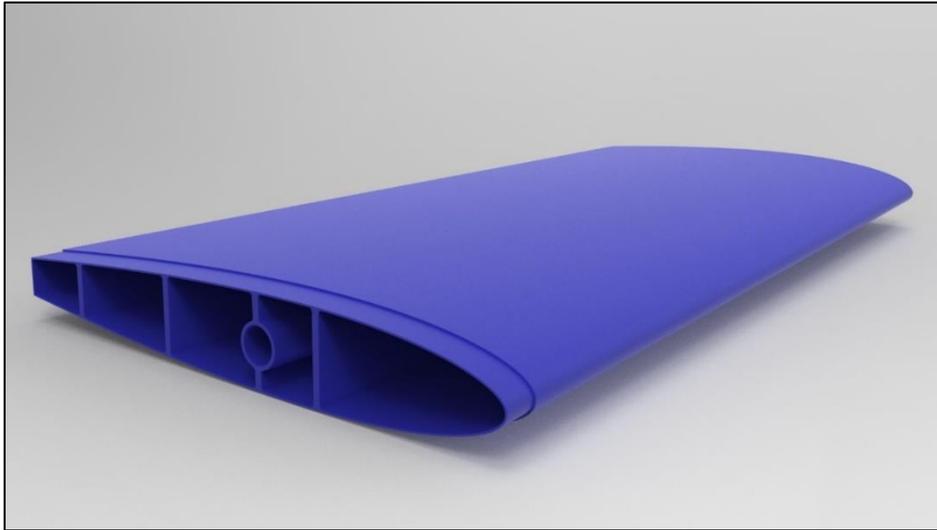


Figura 3.6. Extensión del ala - vista isométrica [Autores].

- **Soporte motor**

En medio de las dos secciones del ala, sobre el borde de ataque va acoplado un soporte el cual permite el acople entre el ala y un tubo cuadrado de veinte milímetros (20 mm). Ver Figura 3.7. Esto permite que se puedan separar los motores frontales del ala.

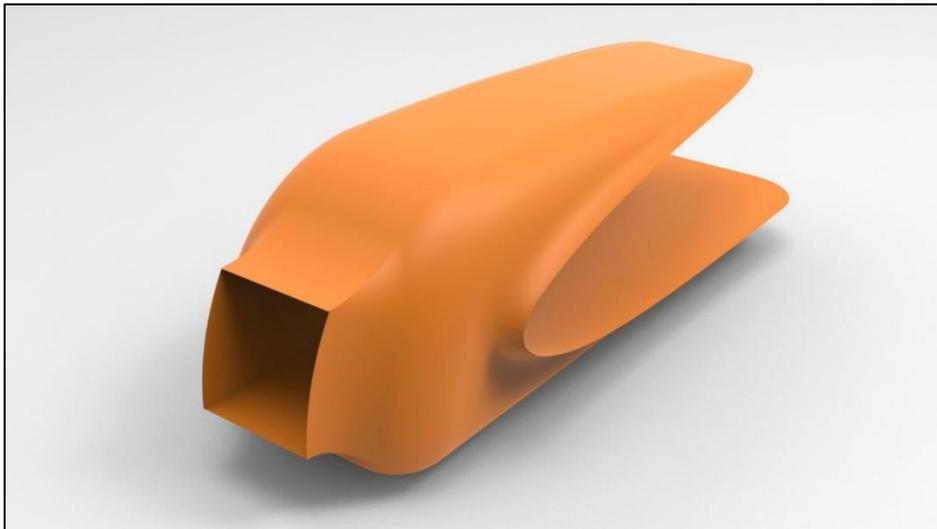


Figura 3.7. Soporte motor – vista isométrica [Autores].

- **Alerón raíz**

Para el diseño de los alerones se hace un diseño sólido, el cual tiene dos aberturas para el encaje y fijación de las bisagras. Este alerón como su nombre lo dice es el correspondiente a la primera sección del ala, la cual va pegada al fuselaje. Ver Figura 3.8.

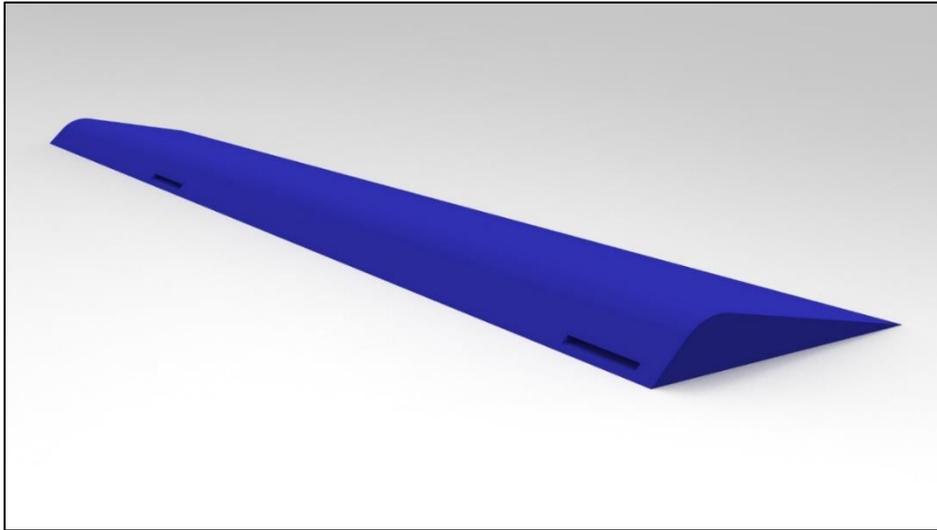


Figura 3.8. Alerón raíz – vista isométrica [Autores].

- **Alerón extensión**

Este alerón al ir junto a la extensión del ala tiene un ancho menor que la otra sección, sin embargo, tiene la misma cantidad de aberturas para las bisagras. Ver Figura 3.9. En el lado más ancho se pega junto con el Alerón raíz.

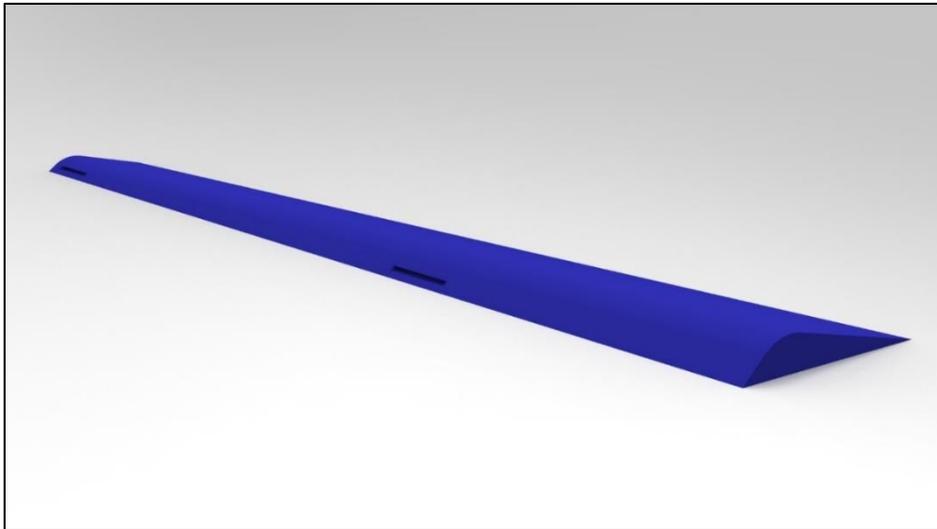


Figura 3.9. Alerón extensión – vista isométrica [Autores].

- **Winglets**

Estos Winglets están diseñados para mejorar el vuelo de la aeronave cuando esté en el modo de vuelo horizontal, alternando el flujo de aire cerca de las puntas alares. En la cara exterior de cada una hay un orificio para ajustarlas al ala mediante un tornillo. Ver Figura 3.10.

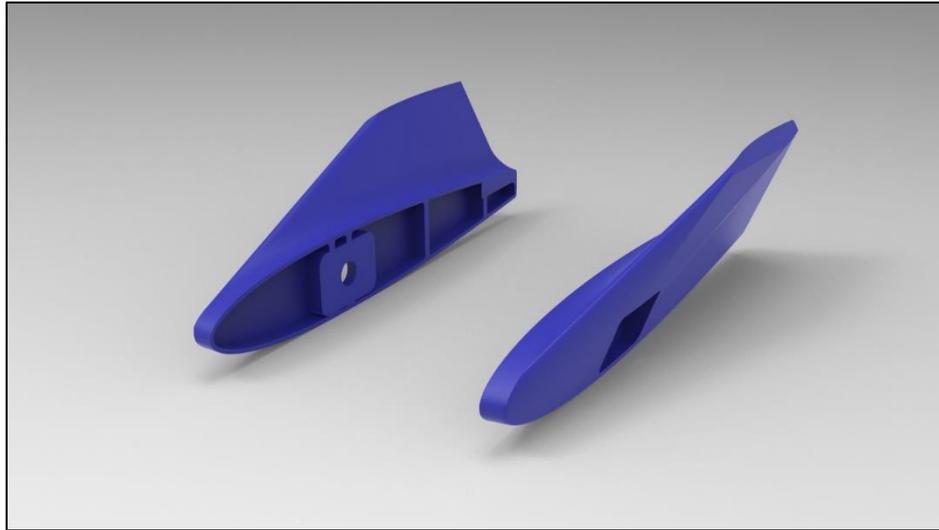


Figura 3.10. Winglets - vista isométrica [Autores].

3.3.2. Fuselaje

Para el diseño del fuselaje este se divide en tres partes, las cuales son el cuerpo, la punta y la tapa. Esto debido a que facilita el proceso de impresión y además permite manipular los elementos que están almacenados allí tales como la batería o el sistema de control en caso de que ya se haya ensamblado la aeronave.

- **Cuerpo del fuselaje**

El cuerpo del fuselaje es diseñado de una forma ovoide, ya que esto permite una buena aerodinámica en la pieza. En medio de la pieza se genera una concavidad, lo que permite que posteriormente puedan ser almacenados allí los sistemas de control, así como también la batería. En medio de los laterales del fuselaje hay unos agujeros de $3/8$ de pulgada, ya que horizontalmente irá atravesado un tubo circular de aluminio el cual sirve para mantener alineadas y dar rigidez a las alas. Ver Figura 3.11.

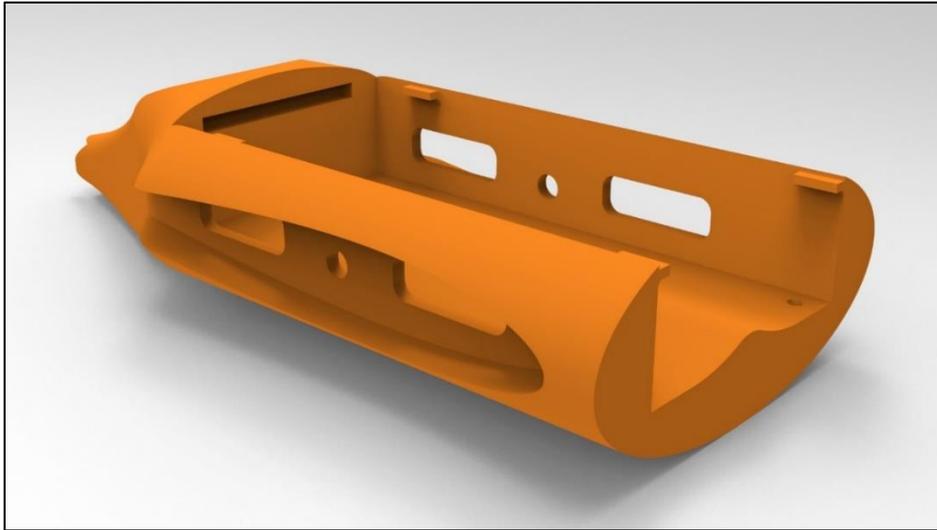


Figura 3.11. Cuerpo del fuselaje – vista isométrica frontal [Autores].

En la parte trasera del fuselaje hay una abertura, ya que ahí va acoplado un tubo cuadrado de veinte milímetros (20 mm). Ver Figura 3.12. Esto con el fin de unir el fuselaje con el empenaje.

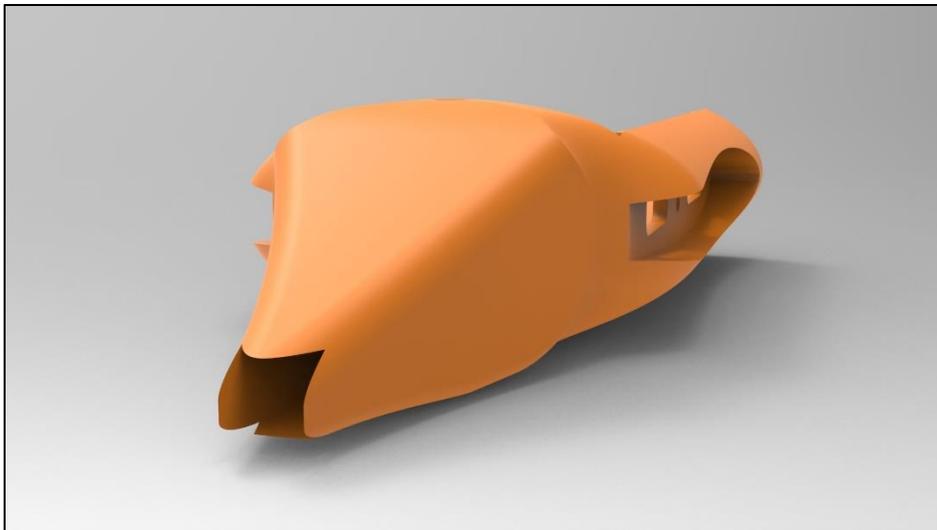


Figura 3.12. Cuerpo del fuselaje - vista isométrica trasera [Autores].

- **Punta del fuselaje**

La punta del fuselaje se hace de forma puntiaguda, disminuye la resistencia del aire cuando la aeronave vuele de forma horizontal. El vaciado permite guardar objetos dentro de esta punta y además reducir el peso de la aeronave, en la parte trasera de la punta hay tres soportes, los dos inferiores que sirven para anclar la punta al Cuerpo del fuselaje y uno en la parte superior para anclarla a la Tapa del fuselaje. Ver Figura 3.13.

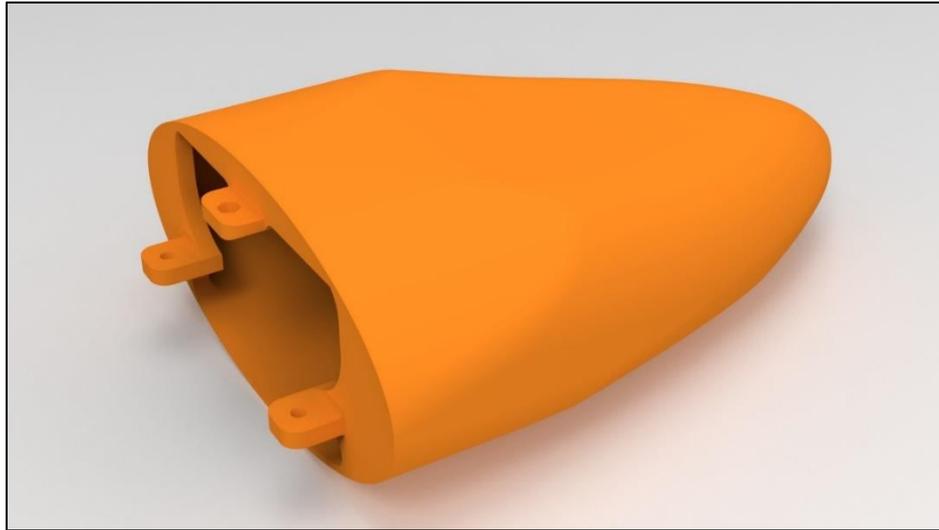


Figura 3.13. Punta del fuselaje - vista isométrica [Autores].

- **Tapa del fuselaje**

La tapa del fuselaje es una parte que encaja en la parte superior del cuerpo del fuselaje y se ajusta a la punta del fuselaje mediante un tornillo para ajustar esta pieza. Ver Figura 3.14.

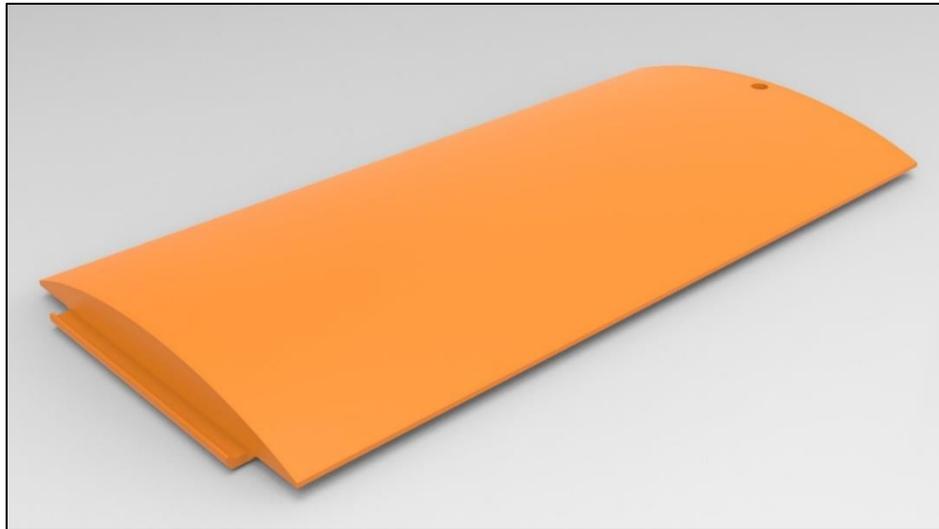


Figura 3.14. Tapa del fuselaje - vista isométrica [Autores].

3.3.3. Empenaje

El empenaje o cola del avión está compuesta por múltiples partes, esto es para poder imprimir más fácilmente esta parte. Aunque las partes móviles por defecto deben ser impresas aparte. El ensamblaje completo del empenaje puede verse en la Figura 3.15.

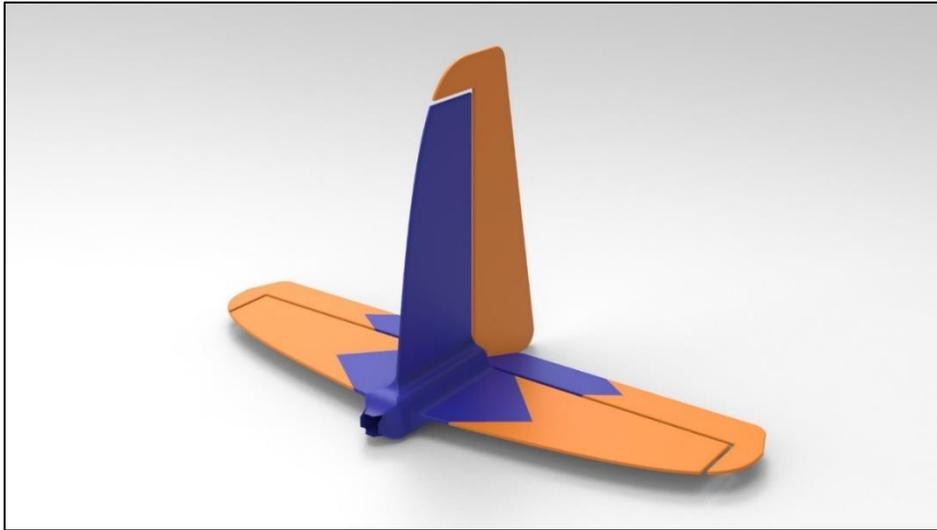


Figura 3.15. Empenaje de la aeronave - vista isométrica [Autores].

- **Sección central**

La sección central del empenaje tiene una abertura en el frente para acoplar esta parte a un tubo cuadrado de veinte milímetros (20 mm), así permitiendo juntar el empenaje con el fuselaje y el resto de la aeronave. También en la parte superior está el estabilizador vertical donde hay dos aberturas para insertar las bisagras que permitirán el movimiento del timón. Finalmente, en los costados están las bases para los estabilizadores horizontales. Ver Figura 3.16.

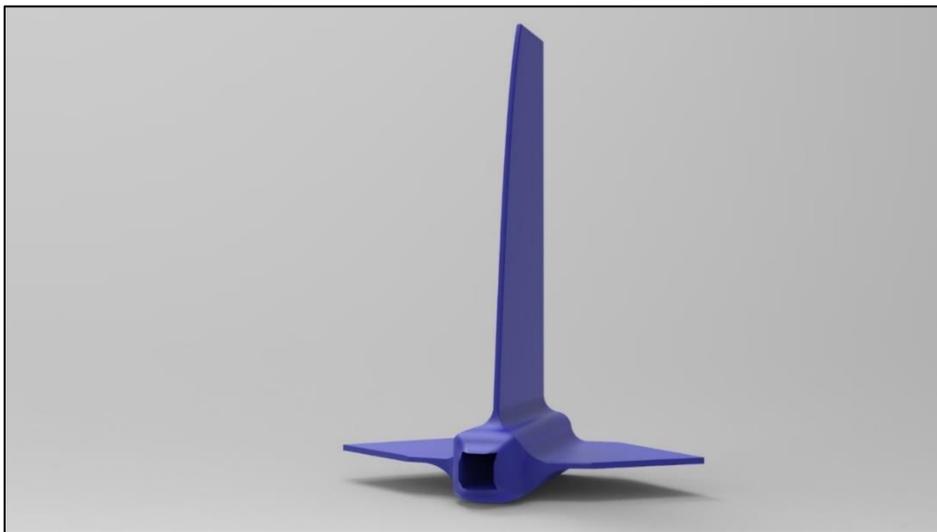


Figura 3.16. Sección central empenaje - vista isométrica [Autores].

- **Elevador**

El elevador o timón de profundidad está compuesto por tres partes, las cuales van pegadas y reforzadas en sus uniones para distribuir mejor los esfuerzos de la pieza. En la parte frontal de la pieza central hay dos aberturas para las bisagras, mientras

que las piezas laterales tienen una abertura cada una para insertar bisagras. Ver Figura 3.17.

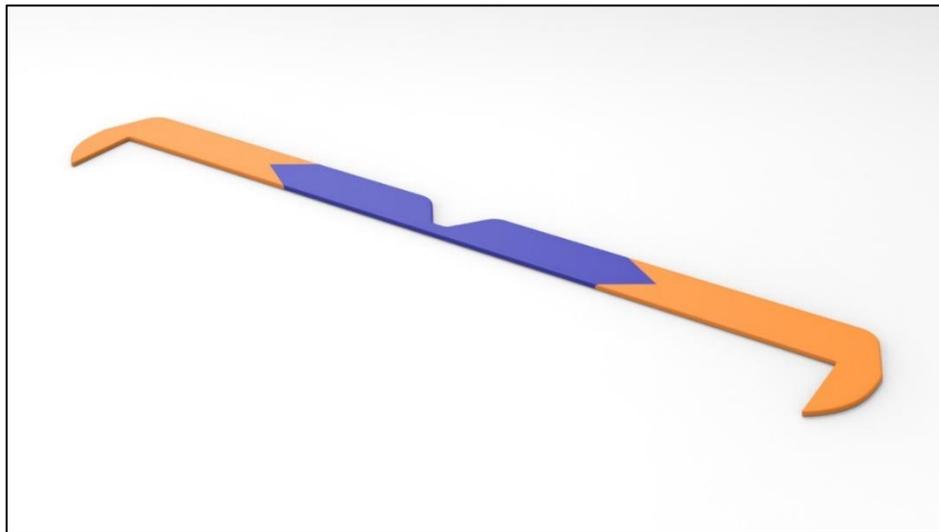


Figura 3.17. Elevador - vista isométrica [Autores].

- **Estabilizadores horizontales**

Dos piezas componen los estabilizadores horizontales, estas van pegadas a la sección central y se refuerzan mediante resina. En la parte posterior de las piezas cada una tiene una abertura para insertar las bisagras. Ver Figura 3.18

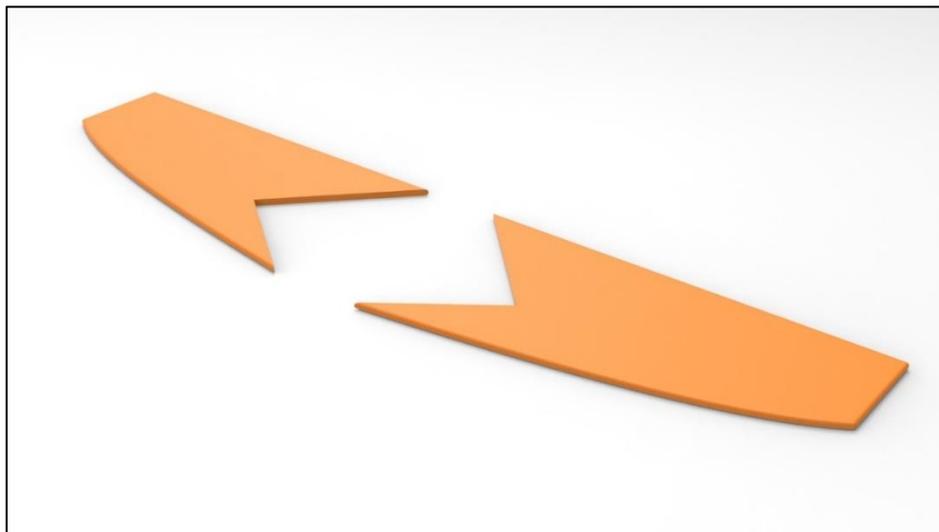


Figura 3.18. Estabilizadores horizontales - vista isométrica [Autores].

- **Timón de dirección**

El timón de dirección va unido a la sección central del empenaje mediante tres bisagras las cuales van en la parte posterior del estabilizador vertical, mientras que las tres aberturas están en la parte frontal de este. Ver Figura 3.19.

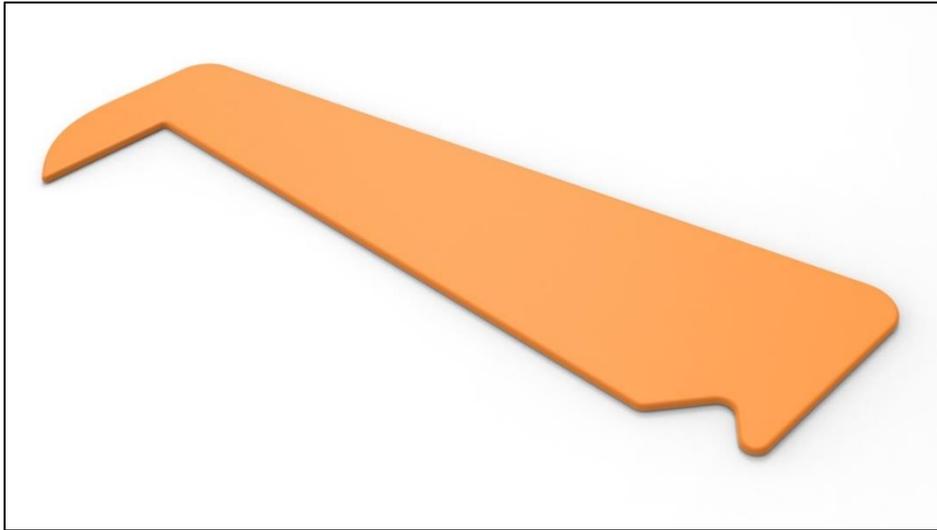


Figura 3.19. Timón de dirección - vista isométrica [Autores].

3.3.4. Accesorios

- **Soporte servomotores traseros**

Esta pieza tiene un agujero cuadrado en el centro ya que va en el tubo del empenaje, en la parte posterior tiene una concavidad que encaja con la parte frontal del empenaje. Los dos agujeros rectangulares en los laterales están sirven para encajar los servomotores que moverán el timón de dirección y el elevador, mientras que en la parte inferior hay un soporte con un agujero cuadrado que es donde irá la pata trasera del tren de aterrizaje. Ver Figura 3.20 y Figura 3.21.

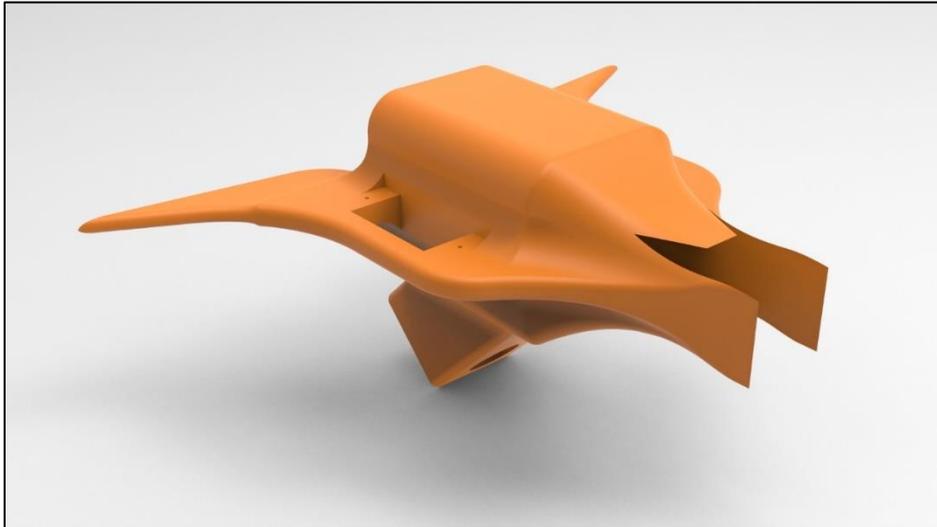


Figura 3.20. Soporte servomotores traseros - vista frontal isométrica [Autores].

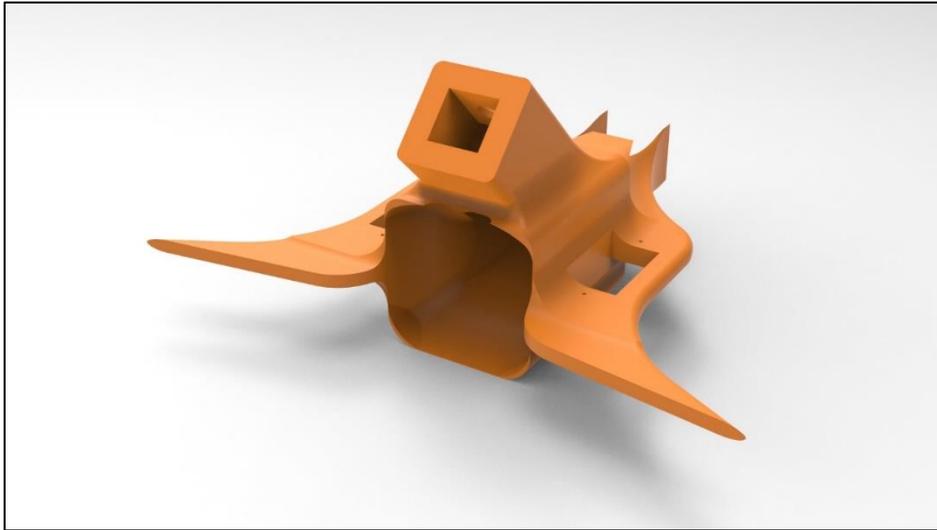


Figura 3.21. Soporte servomotores traseros - vista posterior isométrica [Autores].

- **Soporte tren delantero**

Esta pieza va ubicada en la parte inferior del cuerpo del fuselaje, en la parte central tiene un agujero para fijar esta pieza mediante un tornillo. En la parte inferior lleva dos soportes donde irán ubicadas dos patas del tren aterrizaje, estos dos soportes también cuentan con un agujero cada uno para fijar las piezas mediante un tornillo. Ver Figura 3.22.



Figura 3.22. Soporte tren delantero – vista isométrica [Autores].

- **Pie tren de aterrizaje**

Se diseñan un tipo de pie que va en el extremo inferior de cada una de las tres patas del tren de aterrizaje, ver Figura 3.23.



Figura 3.23. Pie tren de aterrizaje - vista isométrica [Autores].

- **Soportes motores**

El soporte para los motores está compuesto de dos piezas, la primera es la encargada de sostener los servomotores del sistema tiltrotors con los tubos de las alas. Por otro lado, la segunda pieza se encarga de conectar el servomotor con el motor brushless, para así el servomotor rotar la posición de los motores brushless según convenga. Ver Figura 3.24.

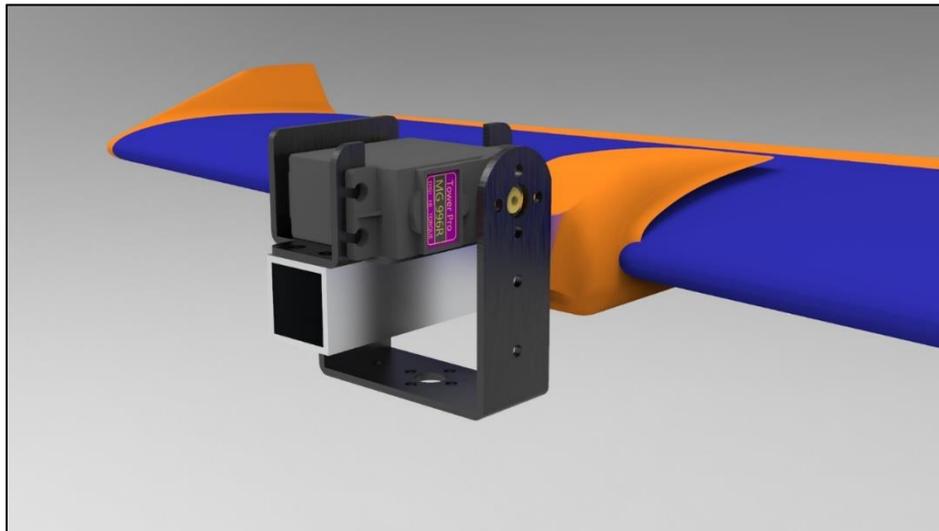


Figura 3.24. Soporte motores - vista isométrica [Autores].

3.4. Construcción y ensamblaje

Posterior al diseño de las piezas, cada una de estas se exporta a un archivo con extensión STL, ya que este formato puede ser leído por las impresoras 3D. Ver Figura 3.25.

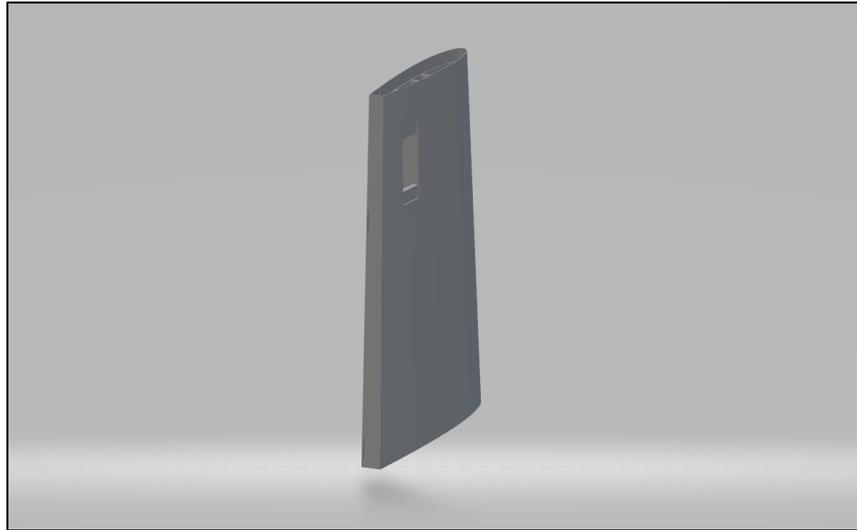


Figura 3.25. Raíz del ala en formato STL [Autores].

Posteriormente se carga el archivo STL al slicer, donde se configuran los parámetros de impresión y se exporta el archivo con extensión (.gcode). La impresora puede leer el archivo directamente desde un cable USB a USB o guardando el archivo en una memoria USB. Ver Figura 3.26.

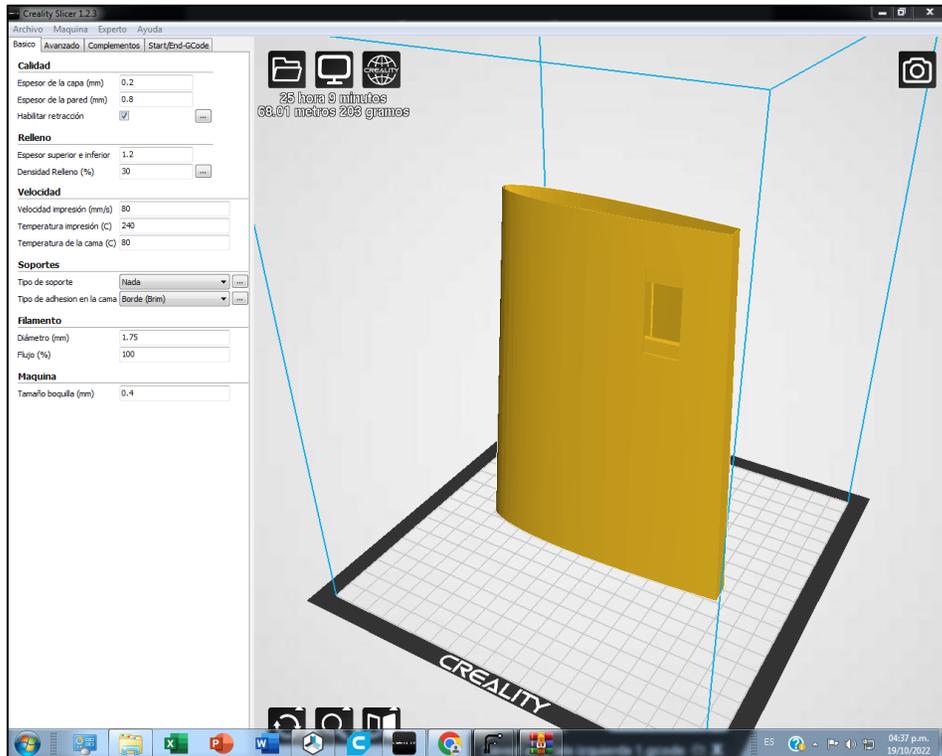


Figura 3.26. Raíz del ala en Creality Slicer [Autores].

La impresora va extruyendo y depositando el material capa por capa en el lugar correcto según las instrucciones del modelo 3D, cada capa se solidifica y da paso para formar la base de la siguiente. Figura 3.27.



Figura 3.27. Impresión pieza raíz del ala [Autores].

Para la impresión de piezas con geometría más compleja se utilizan soportes para obtener una impresión de la pieza más precisa y que la impresora pueda depositar material sobre zonas donde posteriormente estará una concavidad. Ver Figura 3.28.

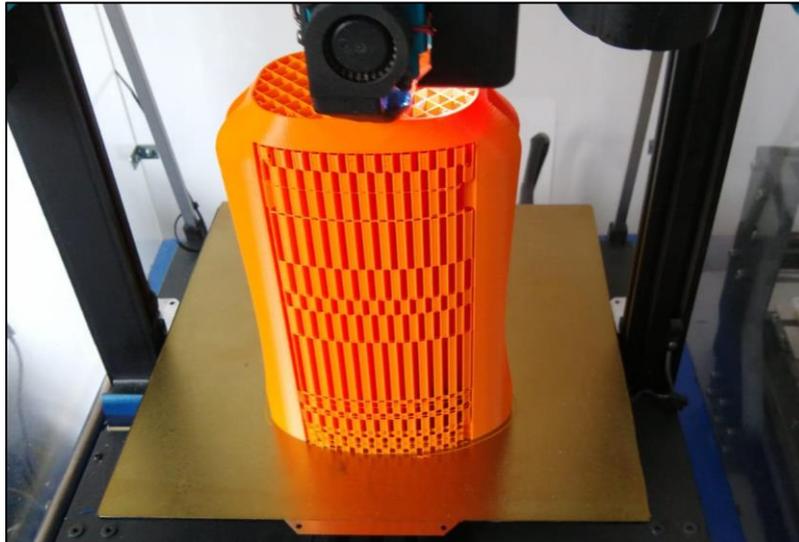


Figura 3.28. Impresión cuerpo del fuselaje con soportes [Autores].

El ensamblaje de las piezas se hace manualmente, las piezas se encajan en las juntas diseñadas y luego se hace presión para ajustarlas en su sitio. Así mismo se insertan los perfiles cuadrados y circulares de aluminio los cuales fortalecen la estructura de la aeronave contra esfuerzos como torsión y tracción. Ver Figura 3.29.

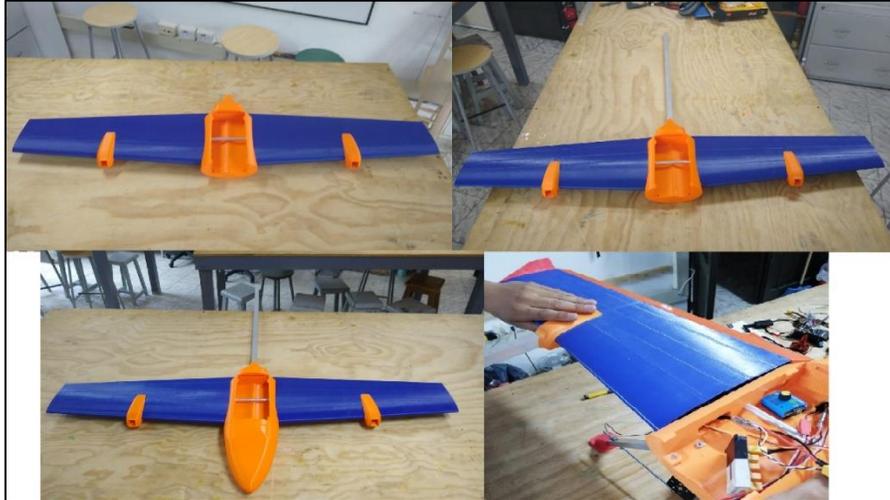


Figura 3.29. Ensamblaje del fuselaje y alas [Autores].

Los motores brushless se colocan en su posición y se atornillan utilizando llaves Allen en el soporte de los servos frontales que conforman el sistema de tilt rotadores. Ver Figura 3.30.

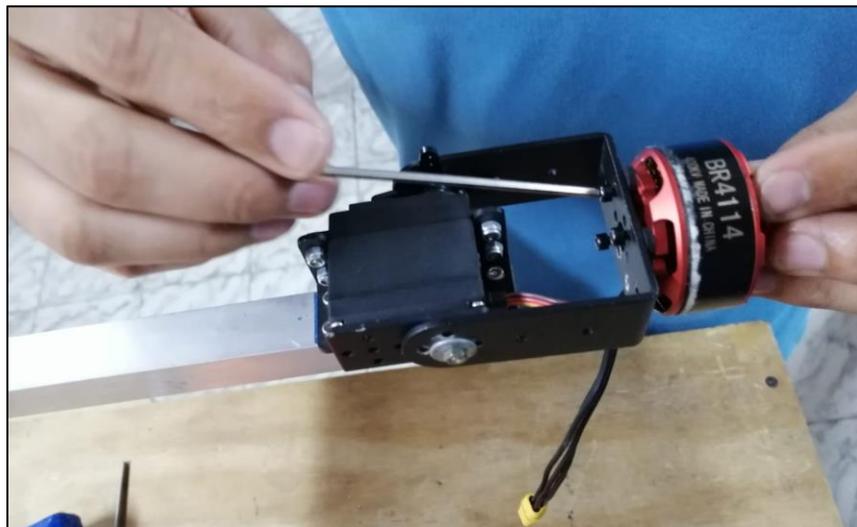


Figura 3.30. Ensamblaje de motores brushless [Autores].

Los servomotores encargados de mover los alerones, elevador y timón de dirección se colocan en su posición y posteriormente se ajustan mediante un destornillador de estrella como se puede ver en la Figura 3.31.



Figura 3.31. Ensamblaje servomotor alerón [Autores].

3.5. Componentes de los sistemas de control y electrónico

Después de haber completado el diseño y la impresión de las piezas de la aeronave en Acido Poliláctico (PLA), se seleccionan los componentes electrónicos y electromecánicos que van a ser utilizados. Los componentes serán implementados en el sistema de control, de alimentación y propulsión de la aeronave, así como también el mecanismo tilt rotor implementado en los dos motores frontales. A continuación, se describen los dispositivos implementados en la aeronave teniendo en cuenta los requerimientos de esta misma.

3.5.1. Autopiloto PIXHAWK 2.4.8

El PIXHAWK 2.4.8 también conocido como PIXHAWK PX4 es un autopiloto popular para propósitos generales basado en el proyecto Pixhawk. Este autopiloto fue elegido debido a su alta fiabilidad en proyectos de investigación y desarrollo, además de sus altas prestaciones. Este autopiloto permite trabajar con VANT de ala fija y de ala rotatoria además de quadcopter. En la Figura 3.32 se explica la función de cada conector.

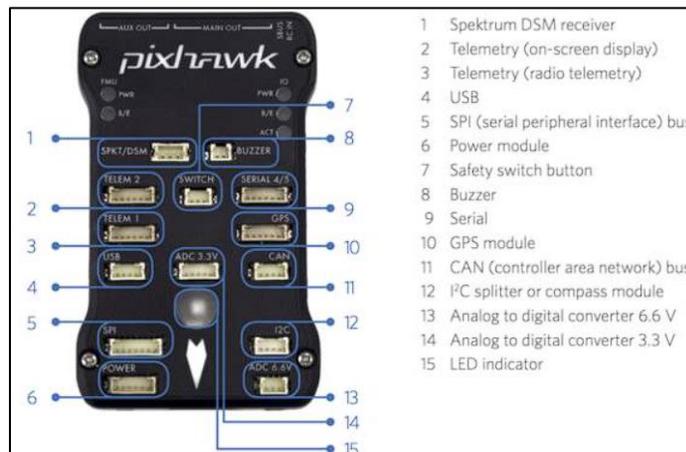


Figura 3.32. Pines de conexión PIXHAWK PX4 2.4.8 - panel frontal [59].

Este sistema de control de PIXHAWK posee un procesador Cortex-M4F de 32 bits, una frecuencia de 168MHz, 256 KB de RAM y una memoria flash de 2MB. A continuación, en la Tabla 3-2 enseñan los datos que hay en la ficha técnica de este sistema de control.

Tabla 3-2. Ficha técnica PIXHAWK PX4 2.4.8 [59, p. 2].

Peso y dimensiones	Dimensiones	82.2x51.8x16.5mm (3.2"x2"x0.65)
	Peso	38g (SOLO LA PIXHAWK)
Especificaciones de hardware	Procesador principal	STM32F427VIT6
	Coprocesador	STM32F100CBT6
Sensores	Giroscopio	MPU6000
	Brújula electrónica	HMC5883L
	Barómetro	MS5611
	Puerto	XH socket
	SPKT/DSM	1
	UART	2 (con CTS/RTS)
	Puerto USB	2
	Buzzer	1
	Switch	1
	Puerto ADC	3,3V y 6,6V
	Puerto Serial 4/5	1
	GPS UART	1
	Puerto CAN	1
	Puerto SPI	1
	Módulo de poder	1
	I2C	1
	RC in (1X Signal Supported)	S.BUS
RSSI Signal Strenght Input	PWM/3.3V	
Salida PWM	8 configurables	

	Salida auxiliar	6 configurables
	Puerto SD	1
Modelos adaptables	Multirrotores/Ala fija/VTOL/Carro/Bote/Robot	
Especificaciones	Voltaje operativo	5.1V
	Voltaje USB	5V ± 0.3V
	Voltaje servos	Entrada no aplicable
	Temperatura operativa	-40°C – 80°C

3.5.2. Motores brushless

Para esta aplicación se seleccionan motores brushless o motores sin escobillas, ya que estos permiten ser configurados mediante PWM (modulación por ancho de pulso). Este tipo de motores es ideal para aplicaciones como aeronaves de ala rotatoria tanto como para aeronaves de ala fija, lo cual hace a estos motores ideales para una aeronave con tiltrotors como es el caso. El motor seleccionado es el Racerstar BR4114 400KV, el cual puede llegar a soportar una corriente de hasta 25.5 A. Ver Figura 3.33.



Figura 3.33. Motor Brushless Racerstar BR4114 [Autores].

3.5.3. Servomotores

Los servomotores cumplen un rol bastante importante en la aeronave, ya que estos permiten un control preciso en términos de posición angular, aceleración y velocidad. Estas características de los servomotores permiten mover diferentes piezas de la aeronave tales como los alerones, el timón de dirección, el elevador y los tiltrotors con una gran precisión.

- **MG995**

Estos servomotores son los encargados del sistema Tiltrotors, es decir que se encargan de realizar la transición entre el modo de vuelo vertical y horizontal. Estos

servomotores poseen un torque de 8.5 kg/cm con una alimentación de 4.8V o 10 kg/cm con una alimentación de 6V. Su peso es de 55 g, tienen una velocidad de 0.2s/60° y su ángulo de rotación es de 120°. El material del engranaje es metálico y sus dimensiones son de 40.7x19.7x42.9 mm. Además, su tipo de conector es universal, lo cual le da compatibilidad con la mayoría de las tarjetas electrónicas y sistemas de control existentes en el mercado. Ver Figura 3.34.



Figura 3.34. Servomotor MG995 [60].

- **Corona CS-929MG**

Estos servomotores son más pequeños que los anteriores y tienen un torque menor, ya que son encargados de otras funciones como la de mover los alerones, el timón de dirección y el elevador. Las dimensiones de estos servomotores son de 22.6x11.4x24.6 mm, tienen un peso de 13.6 g, una velocidad de 0.14s/60° y poseen un torque de 1.40 kg/cm. Ver Figura 3.35.

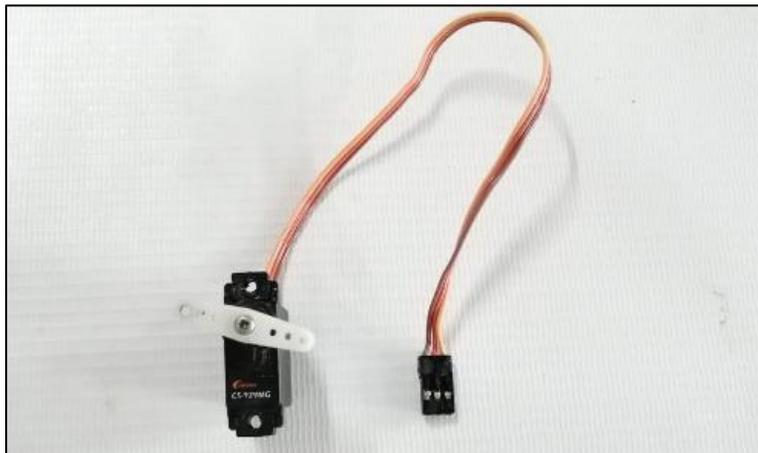


Figura 3.35. Servomotor Corona CS-929MG [Autores].

3.5.4. Speed Control (Controlador de velocidad)

Los speed control también conocidos por sus siglas en inglés como ESC cumplen con la función de variar la velocidad de un motor eléctrico y de definir el sentido de giro de este mismo. Para manejar los motores de este proyecto se eligieron los speed control Makerfire BLHeli-32 32Bit 35A ESC. La arquitectura de 32 Bits permite un rendimiento mucho más rápido en comparación a ESC más antiguos como los de 8 bits, el sistema contiene 12 capacitores cerámicos que permiten tener un sistema más seguro y estable en términos energéticos. Además, posee un transistor de potencia MOSFET Toshiba N Channel y su procesador es un STM32F0. El fabricante recomienda alimentar a una batería Li-Po 2-5s. Ver Figura 3.36.

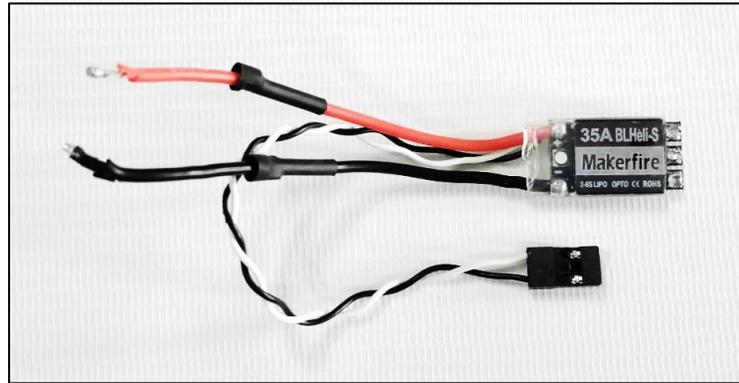


Figura 3.36. ESC Makerfire 35A [Autores].

3.5.5. Módulo 3DR

El módulo de potencia es una manera sencilla de proporcionar energía limpia de una batería Li-Po, además también proporciona en tiempo real mediciones de consumo de corriente y voltaje de la batería. El regulador emite 5.3V y un máximo de 2.25A, este módulo se emplea para alimentar elementos como el receptor RC, GPS y radio, mientras que los servos deben ser alimentados por los ESC. Ver Figura 3.37.

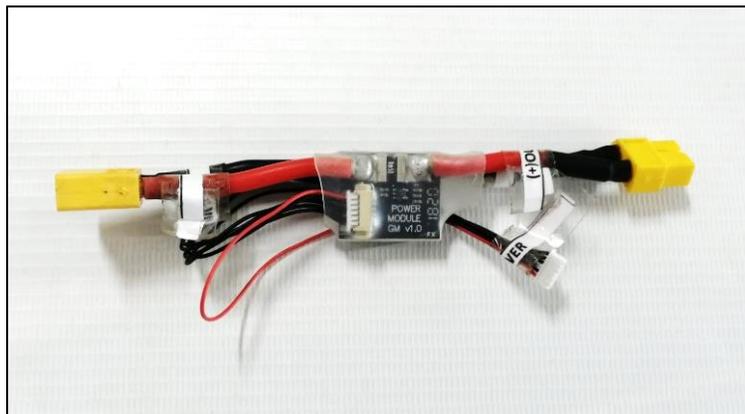


Figura 3.37. Módulo de alimentación [Autores].

3.5.6. UBEC

Un UBEC por sus siglas en inglés (Universal Battery Elimination Circuit) es un dispositivo electrónico utilizado para proporcionar una alimentación de voltaje constante y regulado. En la aeronáutica es utilizado para brindar una tensión constante para alimentar actuadores como servomotores o ESC. Ver Figura 3.38.

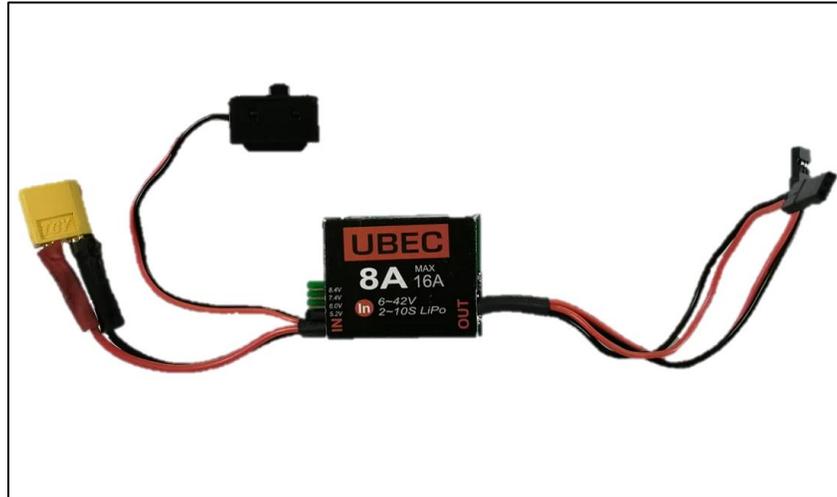


Figura 3.38. UBEC Assan 2-10S Lipo [Autores].

3.5.7. Batería Li-Po

Para la alimentación del sistema electrónico de la aeronave se ha seleccionado una batería tipo Li-Po, de alta capacidad que está diseñada específicamente para el uso de multirrotores. Tiene unas dimensiones de 142x49x43 mm, una capacidad mínima de 5200 mAh, 6 celdas, 22.2V y un peso de 643g. Ver Figura 3.39.



Figura 3.39. Batería MULTISTAR 5200 mAh [Autores].

3.5.8. Control remoto

El control remoto seleccionado para operar la aeronave será el Microzone MC 6-C, ya que se puede controlar e interactuar con la aeronave y sus diferentes modos de vuelo debido a que tiene seis canales. Este control trabaja con una frecuencia de

transmisión de banda ISM de 2.4 GHz, modulación FHSS, además puede alcanzar una distancia remota de hasta 800 metros, lo que lo hace perfecto para controlar la aeronave a largas distancias [61]. Ver Figura 3.40.



Figura 3.40. Control remoto Microzone MC 6-C [Autores].

3.5.9. GPS

Conocido por sus siglas en inglés (Global Positioning System) sistema de posicionamiento global es un sistema de navegación por satélite que permite determinar el lugar de cualquier objeto terrestre, el módulo GPS compatible con el autopiloto permite recibir señales satelitales que permiten conocer en tiempo real la ubicación de la aeronave. Ver Figura 3.41.



Figura 3.41. Módulo GPS con brújula M8N [Autores].

3.6. Conexiones del sistema electrónico

El siguiente paso después de realizar el diseño mecánico es la caracterización de los componentes electrónicos de la aeronave, el sistema de autopiloto Pixhawk está involucrado en gran medida con las conexiones electrónicas, por lo que es importante definir las conexiones que se llevarán a cabo. Una vez se han definido el número de elementos a conectar como motores y servo motores se pueden programar las salidas del autopiloto como se explica más adelante en la sección 3.7 Configuración del autopiloto.

3.6.1. Sensores y periféricos

Lo primero en conectarse son el buzzer y el switch de seguridad, ya que el buzzer es el encargado de manifestar el estado del autopiloto mediante sonidos y el switch de seguridad permite desactivar el modo de encendido seguro para poder activar las salidas PWM para motores y servo motores. Ver Figura 3.42.



Figura 3.42. Conexión del switch de seguridad y el buzzer [Autores].

El siguiente componente por conectar es el módulo GPS, el cual también tiene brújula incorporada. Los cables del módulo deben conectarse a los puertos I2C y GPS de la placa, cabe aclarar que la placa PIXHAWK ya tiene incorporada una brújula, sin embargo, las dos brújulas funcionan de forma conjunta para mejorar la información suministrada por estas. Ver Figura 3.43.



Figura 3.43. Conexión del módulo GPS [Autores].

3.6.2. Comunicación con el radio control (RC)

Para la recepción de la señal del control se conecta el módulo de telemetría el cual viene integrado con una antena mejorar la calidad de recepción de la señal, este módulo se conecta en el puerto TELEM1 como se muestra en la Figura 3.44.

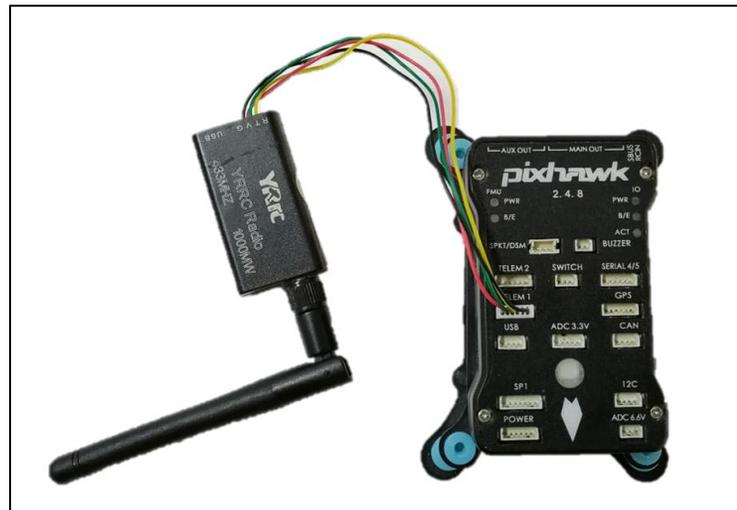


Figura 3.44. Conexión del módulo de telemetría [Autores].

El control remoto viene con un encoder PPM (Modulación por Posición de Pulsos), el cual se conecta a la placa del autopiloto en la entrada marcada como RC. El encoder PPM puede leer hasta 8 canales de control RC, no obstante, en el control que se usará en este proyecto solo tiene 6 canales RC. La conexión se puede ver en la Figura 3.45.

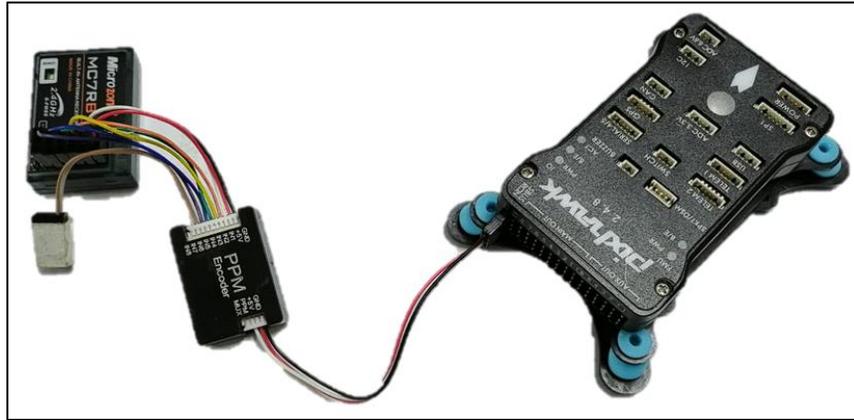


Figura 3.45. Conexión del encoder PPM [Autores].

3.6.3. Alimentación del autopiloto

Para el suministro energético del autopiloto se utilizan una batería tipo Li-Po y un módulo 3DR, la salida de la batería se conecta al módulo 3DR, posteriormente se conecta la salida de 6 pines del módulo 3DR al puerto denominado como POWER en el autopiloto. Ver Figura 3.46.

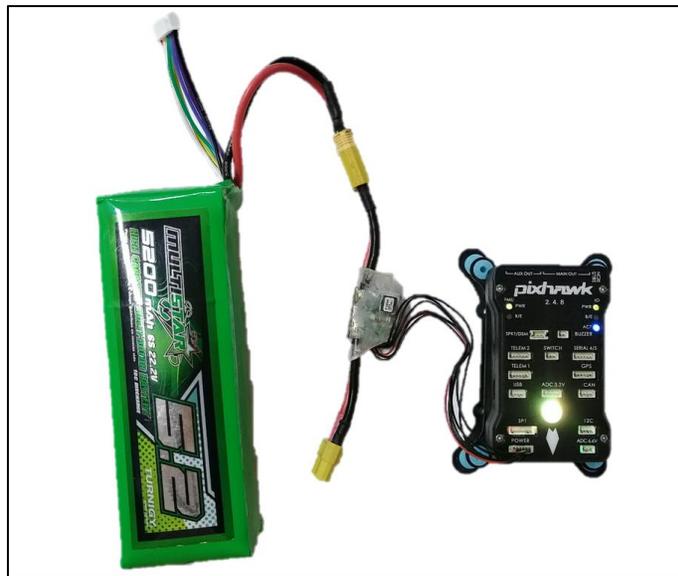


Figura 3.46. Conexión de la alimentación del autopiloto [Autores].

El autopiloto tiene la capacidad de suministrar la corriente suficiente para alimentar los servomotores y los ESC, por lo que se conecta un circuito eliminador de batería BEC por sus siglas en inglés (Battery Eliminator Circuit). El BEC se conecta al servo rail del autopiloto y este lo detecta automáticamente, por lo que pasará de estar energizado de 3.3V que viene por defecto a 5V que es lo que necesitan los dispositivos externos electrónicos. Ver Figura 3.47.

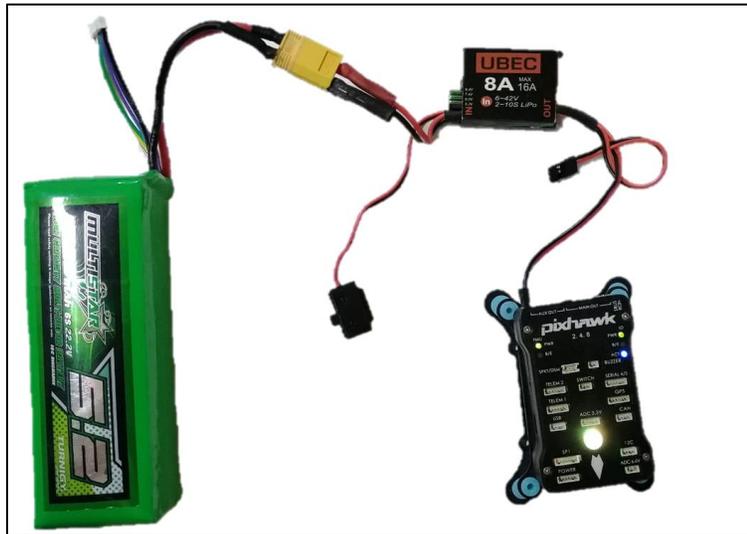


Figura 3.47. Conexión del BEC al autopiloto [Autores].

3.7. Configuración del autopiloto

Para programar el sistema de autopiloto se requiere de un software en el cual se puedan programar diferentes rutinas de vuelo, por ello se elige la aplicación de código abierto Mission Planner en la versión 1.3.79. Este software está implementado para la programación y calibración de los autopilotos Pixhawk, el software viene con varios firmwares por defecto para los modelos de aeronaves con configuraciones más comunes. No obstante, también permite la instalación de firmwares personalizados por la comunidad. Una vez abierto el software debe aparecer la interfaz de inicio similar a la que aparece en la Figura 3.48.

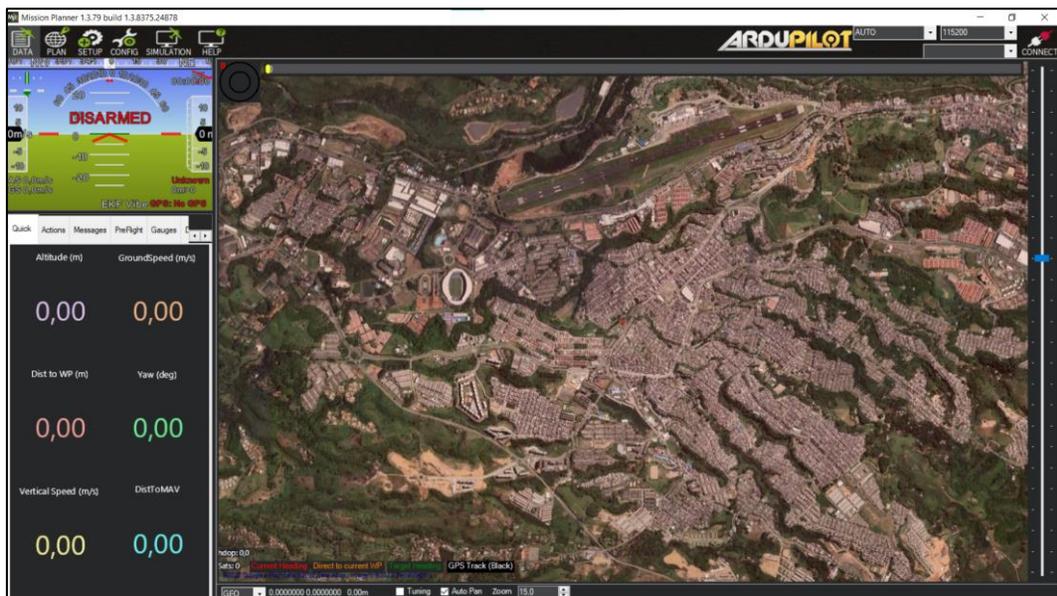


Figura 3.48. Interfaz de inicio Mission Planner [Autores].

3.7.1. Carga del firmware

El software de Mission Planner trae distintos tipos de firmware dependiendo del tipo de aeronave que se vaya a utilizar, no obstante, también permite utilizar distintos tipos de firmwares personalizados y desarrollados por la comunidad para aplicaciones específicas que no estén incluidos. En este caso se eligió utilizar el firmware personalizado de la página de “Finwinghobby”, el cual está optimizado para aeronaves de tipo VTOL. Este puede ser encontrado allí mismo en su página [62].

Para la instalación del firmware personalizado se selecciona el botón de “SETUP” en la parte superior izquierda, luego se selecciona “Install Firmware” ⇒ “Load Custom Firmware”. Ver Figura 3.49.

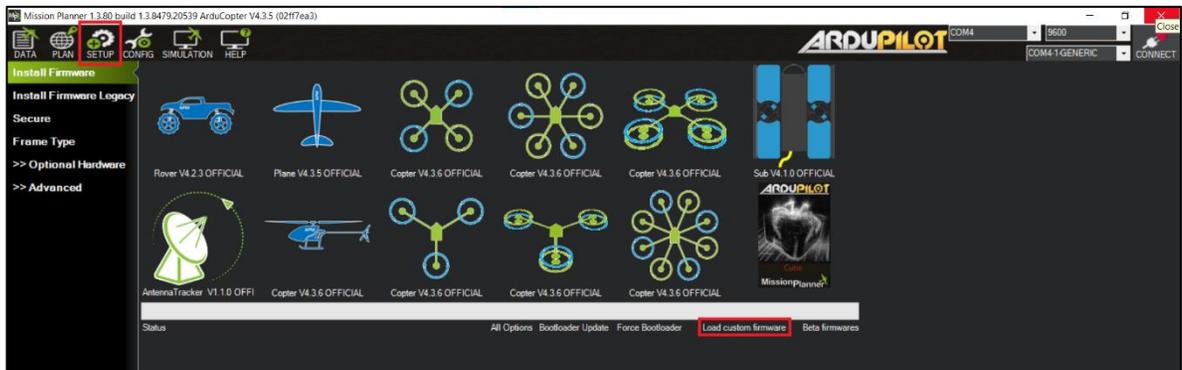


Figura 3.49. Interfaz instalación del firmware [Autores].

Una vez se abre el explorador de archivos del computador se busca la carpeta donde está guardado el firmware y se selecciona el que aparece como “ArduPlane_Pixhawk1_1M.apj”. Ver Figura 3.50.

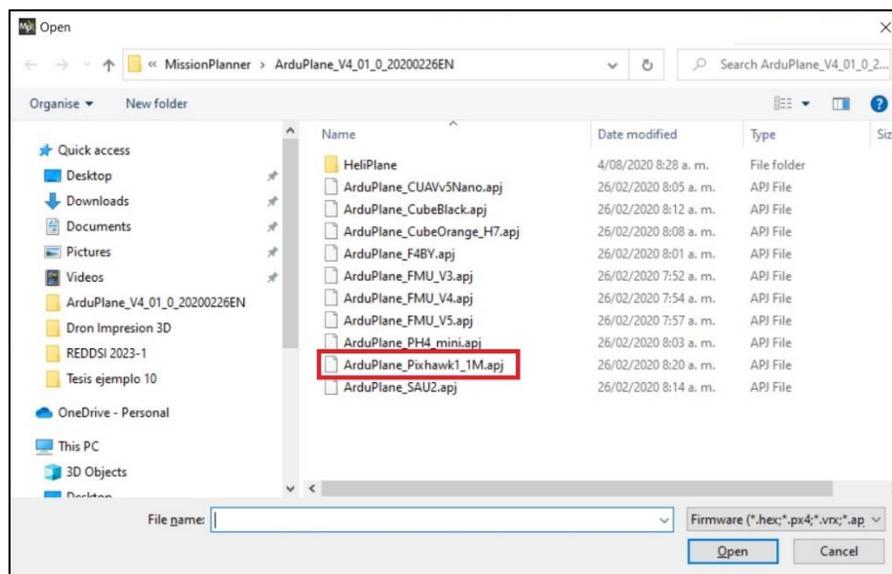


Figura 3.50. Selección del archivo del firmware [Autores].

El software mostrará mediante una barra verde el progreso de como borra el firmware anterior y como carga el nuevo firmware. Ver Figura 3.51.

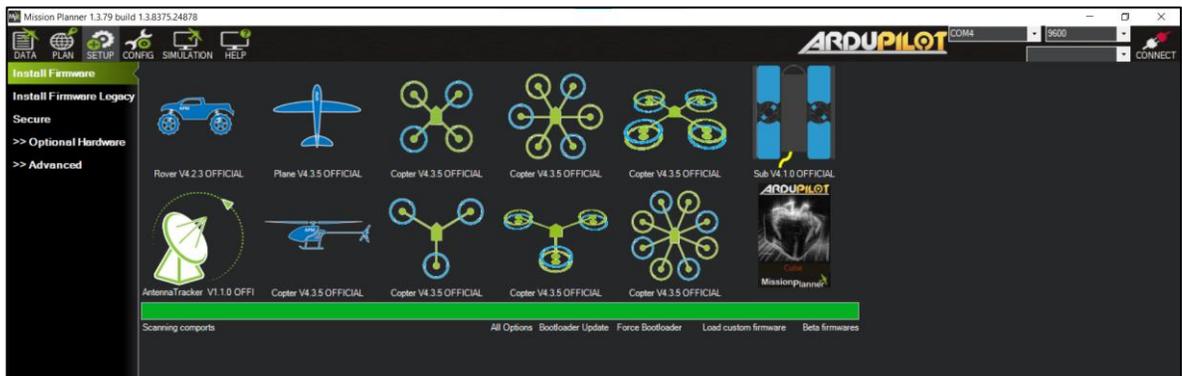


Figura 3.51. Progreso de la instalación del firmware [Autores].

Después haber instalado el firmware, el software nos va a pedir que se desconecte el autopiloto mediante el cable micro USB, luego se presione el botón de OK en el software y posteriormente se reconecte el autopiloto con el cable USB a micro USB. Ver Figura 3.52.

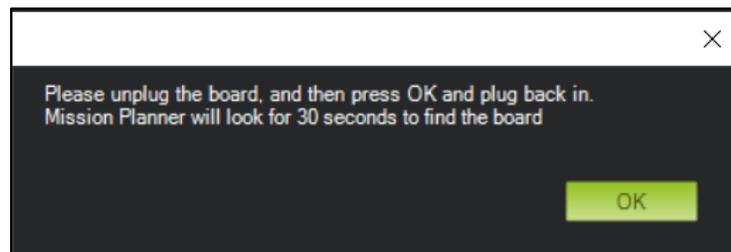


Figura 3.52. Carga del firmware [Autores].

Una vez cargado el nuevo firmware se conecta nuevamente el autopiloto, en la parte superior derecha se selecciona el puerto serial al que esté conectado el autopiloto, el baudrate y posteriormente se selecciona la opción de conectar. Ver Figura 3.53.



Figura 3.53. Parámetros de conexión inicial [Autores].

Una vez conectado el autopiloto el botón de conectar cambia su color a verde y ahora el mensaje dice desconectar, ver Figura 3.54.

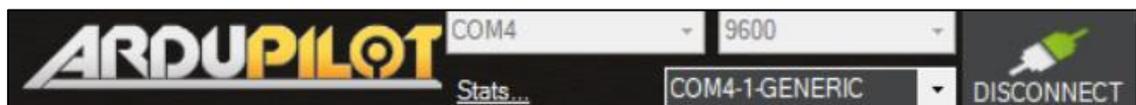


Figura 3.54. Parámetros de conexión en curso [Autores].

3.7.2. Calibración del radiocontrol RC

Para la calibración deben estar conectados al autopiloto el receptor RC y el PPM encoder, además de la antena receptora. En el software se selecciona el botón se “SETUP” en la parte superior izquierda, posteriormente se selecciona “Mandatory Hardware” ⇒ “Radio Calibration”. Para comenzar la calibración se debe seleccionar el botón de “Calibrate Radio”. Ver Figura 3.55.



Figura 3.55. Calibración control RC comienzo [Autores].

Es importante desconectar los motores y los servomotores, en caso de que no sea posible se deben quitar las hélices. Para calibrar el control se deben mover las palancas del control hacia todas las posiciones, esto se ve reflejado en el software como múltiples barras rojas que demarcan los límites. Ver Figura 3.56.

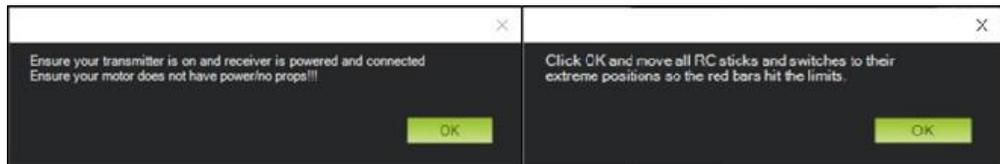


Figura 3.56. Mensajes de advertencia calibración del control [Autores].

Como se puede ver en la Figura 3.57 los límites de las entradas del control están demarcadas en color rojo, una vez terminado de calibrar el control se selecciona el botón “Click when Done”.

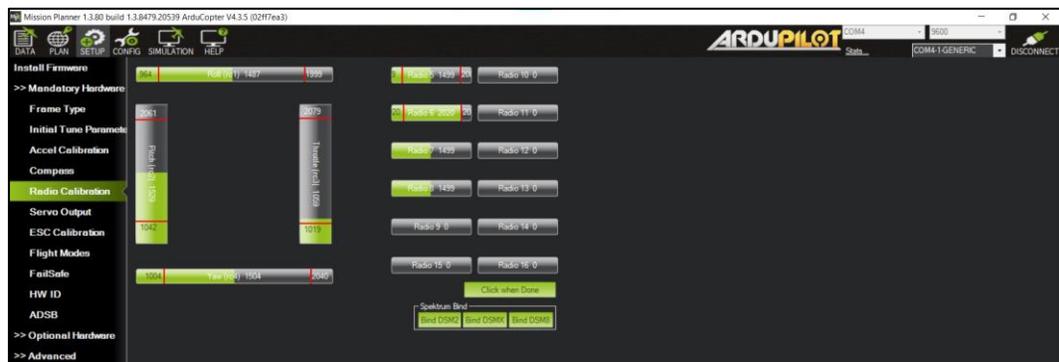


Figura 3.57. Calibración de límites del control RC [Autores].

Una vez se finaliza el proceso de calibración es importante dejar las palancas centradas y la palanca que controla el acelerador que en inglés es “throttle” se debe dejar en el mínimo. Ver Figura 3.58.

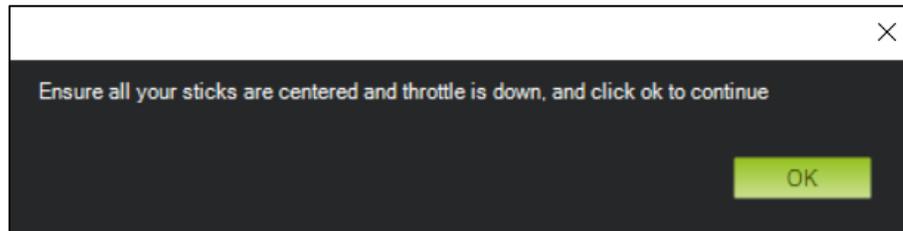


Figura 3.58. Mensaje final calibración RC [Autores].

Por último, el software muestra los valores configurados como mínimos y máximos para cada canal del radiocontrol RC. Ver Figura 3.59.

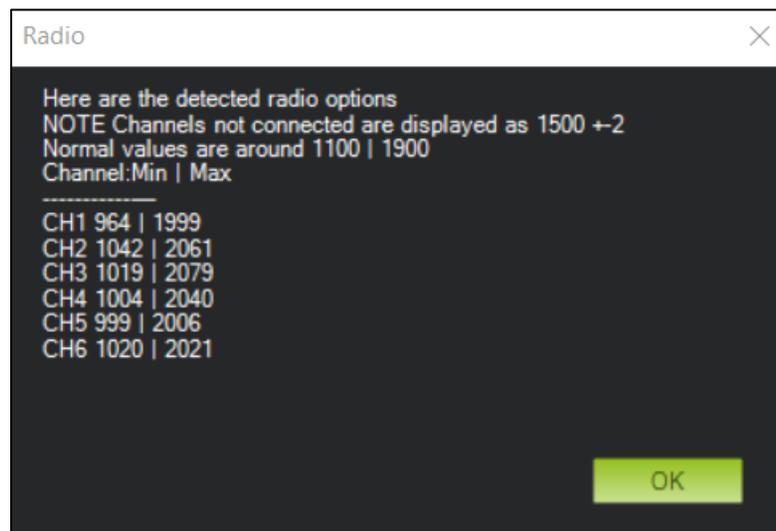


Figura 3.59. Valores límite del control RC [Autores].

3.7.3. Calibración del acelerómetro

Para la calibración del acelerómetro del autopiloto se selecciona en el software el botón de “SETUP” en la parte posterior izquierda, luego se selecciona la opción de “Mandatory Hardware” ⇒ “Accel Calibration”. Para comenzar a calibrar se selecciona el botón que tiene como nombre “Calibrate Accel” ya que este permite calibrar el acelerómetro en todos los ejes. Ver Figura 3.60.

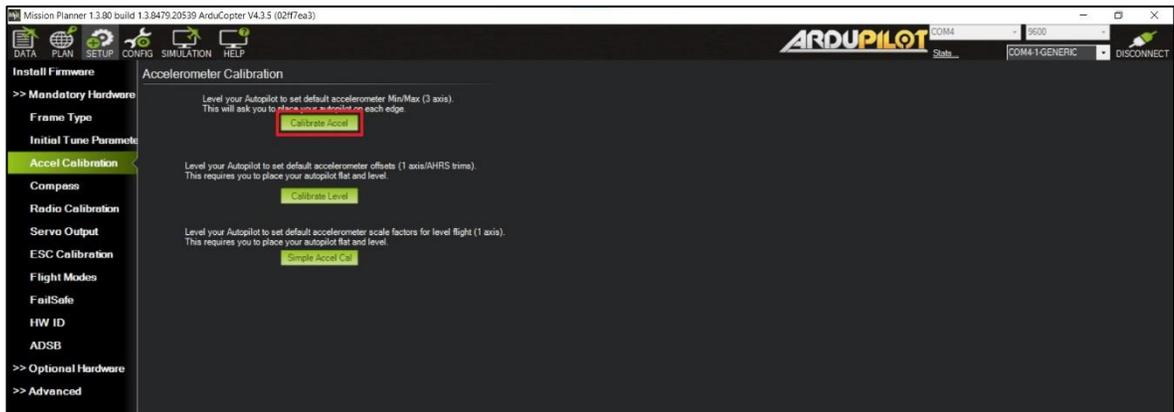


Figura 3.60. Calibración del acelerómetro [Autores].

Una vez ha comenzado el proceso de calibración el software va a pedir que se coloque el autopiloto sobre una superficie nivelada, posteriormente se debe recostar sobre los lados izquierdo y derecho, también pide que se coloque con la punta vertical hacia abajo, hacia arriba y finalmente se tiene que colocar el autopiloto boca arriba.

3.7.4. Configuración del drone como Tricopter

En el software Mission Planner los parámetros que tienen la letra “Q” por delante son los que están relacionados a los “QuadPlane” o aeronaves VTOL. Para acceder a la lista de parámetros se debe ir a “CONFIG” ⇒ “Full Parameter List”. Para habilitar la configuración de la aeronave como QuadPlane, el parámetro “Q_ENABLE” se reemplaza el valor por “1”. Ver Figura 3.61.

Name	Δ	Value	Units	Options	Desc	Fav
Q_ENABLE		1		0:Disable 1:Enable 2:Enable VTOL AUTO	This enables QuadPlane functionality, assuming multicopter motors start on output 5. If this is set to 2 then when starting AUTO mode it will initially be in VTOL AUTO mode.	<input type="checkbox"/>

Figura 3.61. Configuración como QuadPlane [Autores].

Una vez habilitado el parámetro “Q_ENABLE” se selecciona la clase de frame a la cual pertenece la aeronave, este parámetro se refiere a cuál es la cantidad de motores de la aeronave. Los desarrolladores de Mission Planner incluyen múltiples configuraciones recomendadas, en este caso como son tres motores corresponde a un Tricopter. Ver Figura 3.62.

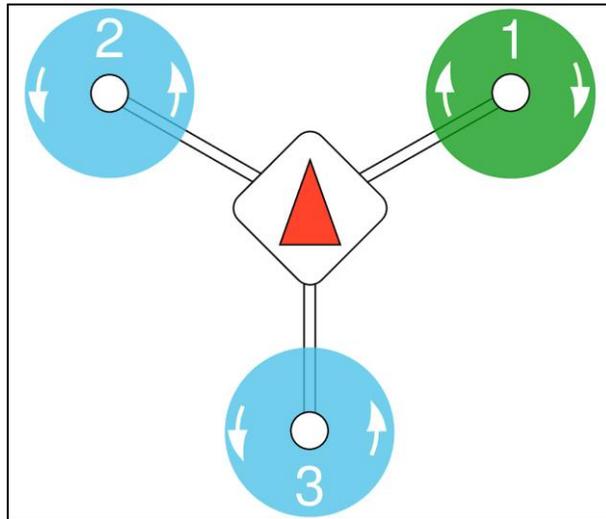


Figura 3.62. Tipo de frame de la aeronave y sentido de giro de los motores [63].

En este caso se selecciona el parámetro “Q_FRAME_CLASS” y se reemplaza el valor por “7”, el cual corresponde a un Tricóptero. Ver Figura 3.63.

Name	Value	Units	Options	Desc	Fav
Q_FRAME_CLASS	7		0:Undefined 1:Quad 2:Hexa 3:Octa 4:OctaQuad 5:Y6 7:Tri 10:Single/Dual 12:DodecaHexa 14:Deca 15:Scripting Matrix 17:Dynamic Scripting Matrix	Controls major frame class for multicopter component	■

Figura 3.63. Configuración del parámetro Q_FRAME_CLASS. [Autores].

3.7.5. Configuración de las salidas del autopiloto

Los tres motores brushless están distribuidos dos al frente, los cuales hacen la rotación como tilt rotors. Además, entre el fuselaje y el empenaje está ubicado el tercer motor brushless, este último no tiene sistema tilt rotor y no se usa cuando la aeronave entra en modo de vuelo horizontal. De acuerdo con la información suministrada por ArduPilot en la Tabla 3-3 se muestran las salidas por defecto a las que están designadas las salidas de cada uno de los motores, en este caso se seleccionarán los primeros tres parámetros ya que son lo que concuerdan con la distribución de la aeronave.

Tabla 3-3. Configuración por defecto de las salidas del Tricóptero [64].

Salida	Opción	Descripción
5	Motor 1	Motor frontal derecho
6	Motor 2	Motor frontal izquierdo
8	Motor 4	Motor trasero
11	Motor 7	Servo tilt rotor trasero

Para cambiar las salidas por defecto del autopiloto en el servo rail se hace desde la lista completa de los parámetros, los comandos que tienen el nombre de “SERVO#_FUNCTION” son los que permiten cambiar la función de cada salida individualmente cambiando su valor y posteriormente confirmando el cambio haciendo click en el botón “Write Params”. En la Figura 3.64 se muestran las diferentes opciones que se pueden seleccionar para las salidas PWM.



Figura 3.64. Opciones de configuración salidas PWM [Autores].

En la Tabla 3-4 se muestran las salidas seleccionadas para los motores de la aeronave.

Tabla 3-4. Configuración de las salidas de los motores [Autores].

COMMAND	VALUE	DESCRIPTION
SERVO5_FUNCTION	33	Motor 1
SERVO6_FUNCTION	34	Motor 2
SERVO8_FUNCTION	36	Motor 4

Los comandos “SERVO#_FUNCTION” modificados dentro del software Mission Planner para los motores se deberían ver como en la Figura 3.65.

SERVO5_FUNCTION	33
SERVO6_FUNCTION	34
SERVO8_FUNCTION	36

Figura 3.65. Salidas PWM de los motores Mission Planner [Autores].

Posteriormente a la configuración de las salidas se conectan los ESC de los motores a cada salida correspondiente PWM para finalizar con la instalación de los motores.

Por otro lado, los servomotores se utilizan para mover piezas de la aeronave como los alerones, el elevador y el timón de dirección. Además de que el sistema de tilt rotores también es manejado mediante servomotores para lograr cambiar el modo de vuelo de la aeronave de vuelo vertical a vuelo horizontal. Para la configuración de los alerones se seleccionan los pines uno y dos del servo rail, para configurarlos como alerones se reemplaza el valor que tengan por defecto y se reemplaza su valor por un “4”. Una vez se hayan escrito los nuevos parámetros el autopiloto reconoce las salidas como alerones, en el software debería verse como en la Figura 3.66.

SERVO1_FUNCTION	4
SERVO2_FUNCTION	4

Figura 3.66. Salidas de los alerones en Mission Planner [Autores].

En el empenaje de la aeronave también tiene dos piezas móviles que son el elevador y el timón de dirección, estos se controlan mediante el tercer y cuarto pin respectivamente. Ver Figura 3.67.

SERVO3_FUNCTION	19
SERVO4_FUNCTION	21

Figura 3.67. Salidas timón de dirección y elevador [Autores].

El sistema de tilt rotores se controlará mediante las salidas once y doce del servo rail, el servomotor de la izquierda tendrá un valor de “75” mientras que el del lado derecho corresponde al valor de “76”. Ver la Figura 3.68.

SERVO11_FUNCTION	76
SERVO12_FUNCTION	75

Figura 3.68. Salidas de los tilt rotores [Autores].

Una vez después de reemplazar los nuevos parámetros en el software de Mission Planner el PinOut del servo rail del autopiloto debería quedar como se muestra en la Tabla 3-5 donde se muestran las salidas PWM a las cuales van conectados los motores y servomotores.

Tabla 3-5. PinOut de las salidas PWM del autopiloto [Autores].

# PWM PINOUT	DESCRIPTION
5	Motor Brushless 1
6	Motor Brushless 2
8	Motor Brushless 3
1 y 2	Aileron
12	Tilt Motor Left
11	Tilt Motor Right
3	Elevator
4	Rudder

Para validar la configuración de todos los parámetros utilizados en las salidas del autopiloto, se selecciona el botón de “SETUP” ⇒ “Mandatory Hardware” ⇒ “Servo Output”. En la Figura 3.69 se pueden observar las salidas del autopiloto, así como cuál es el PWM mínimo y máximo de cada una y también cual es la señal que recibe en tiempo real.

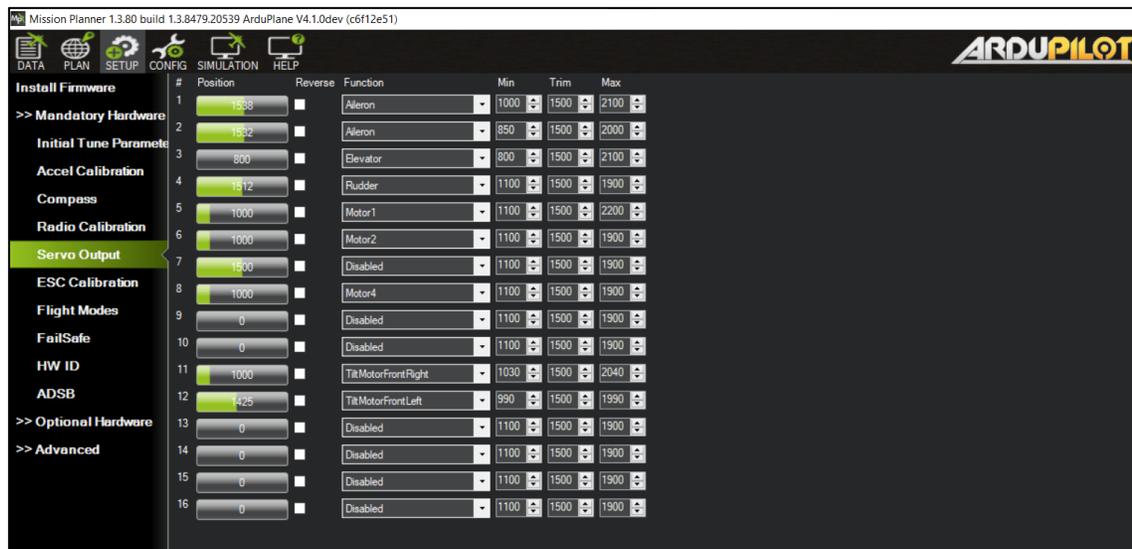


Figura 3.69. Visualización de las salidas PWM en Mission Planner [Autores].

3.7.6. Configuración de los modos de vuelo

Modificando el parámetro “FLTMODE_CH” se selecciona el canal del control RC con el cual se van a cambiar los modos de vuelo, en este caso se reemplaza el valor por “5” el cual corresponde a “Channel 5”. Ver Figura 3.70.

Name	Value	Units	Options	Desc
FLTMODE_CH	5		1:160:Disabled 1:Channel 2:3:Channel 3:4:Channel 4 5:Channel 5 6:Channel 6 7:Channel 7 8:Channel 8 9:Channel 9 10:Channel 10 11:Channel 11 12:Channel 12 13:Channel 13 14:Channel 14 15:Channel 15 16:Channel 16	RC Channel to use for flight mode control

Figura 3.70. Selección del canal para los modos de vuelo [Autores].

Para configurar los diferentes tipos de modos de vuelo se selecciona el botón de “SETUP” ⇒ “Mandatory Hardware” ⇒ “Flight modes”, ver Figura 3.71. El modo de vuelo “QSTABILIZE” es el encargado del vuelo vertical de la aeronave, por lo que es el modo que se utiliza en el despegue y aterrizaje de la aeronave. El modo “FBWA” es el encargado de cambiar del modo de vuelo vertical a horizontal, mientras que en el modo de vuelo “Manual” el piloto tiene el control de todos los actuadores de la aeronave.

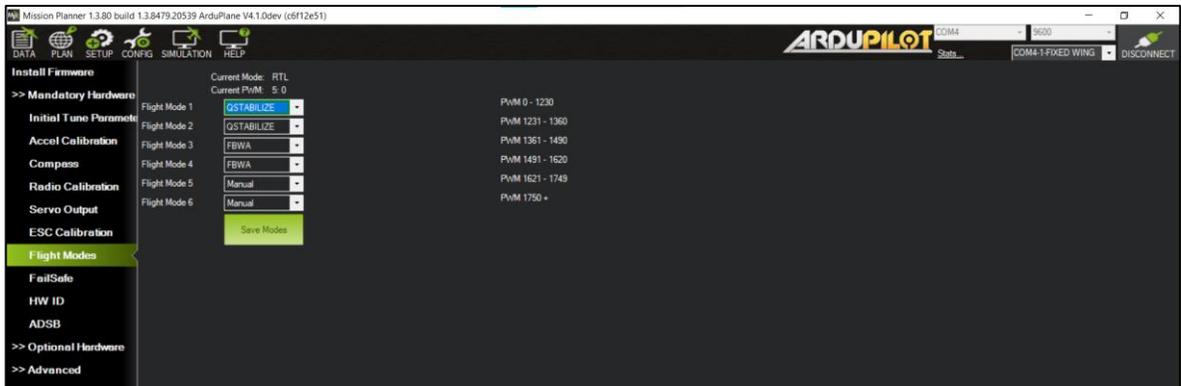


Figura 3.71. Configuración de los modos de vuelo [Autores].

En el parámetro “Q_FRAME_TYPE” se reemplaza el valor por “1”. Ver Figura 3.72.

Q_FRAME_TYPE	1	0:Plus 1:X 2:V 3:H 4:V-Tail 5:A-Tail 10:Y6B 11:Y6F 12:BetaFlightX 13:DJIX 14:CockwiseX 15:1 16:MOTOR_FRAME_TYPE_NYT_PLUS 17:MOTOR_FRAME_TYPE_NYT_X 18:BetaFlightXReversed 19:Y4	Controls motor mixing for multicopter component
--------------	---	---	---

Figura 3.72. Parámetro Q_FRAME_TYPE [Autores].

El valor del parámetro “Q_TILT_TYPE” se reemplaza por “2”. Ver

Q_TILT_TYPE	2	0:Continuous 1:Binary 2:VectoredYaw 3:Bicopter	This is the type of tiltrotor when TILT_MASK is non-zero. A continuous tiltrotor can tilt the rotors to any angle on demand. A binary tiltrotor assumes a retract style servo where the servo is either fully forward or fully up. In both cases the servo can't move faster than Q_TILT_RATE. A vectored yaw tiltrotor will use the tilt of the motors to control yaw in hover. Bicopter tiltrotor must use the tail-sitter frame class (10)
-------------	---	--	---

Figura 3.73. Parámetro Q_TILT_TYPE [Autores].

El parámetro “Q_TILT_MASK” selecciona los motores que tienen sistema de tilt rotores, consiguiendo así que los motores que no tienen este sistema se apaguen o reduzcan cuando la aeronave hace la transición de modo de vuelo vertical a horizontal. Cuando se va a reemplazar el valor de este parámetro se despliega una

lista como se puede ver en la Figura 3.74, para la configuración de este tricopter los únicos que tienen sistema tiltrotors son los motores delanteros: “Motor 1” y “Motor 2”, por lo que se seleccionan estos dos dando como resultado el valor de “3” como se puede ver en la Figura 3.75.

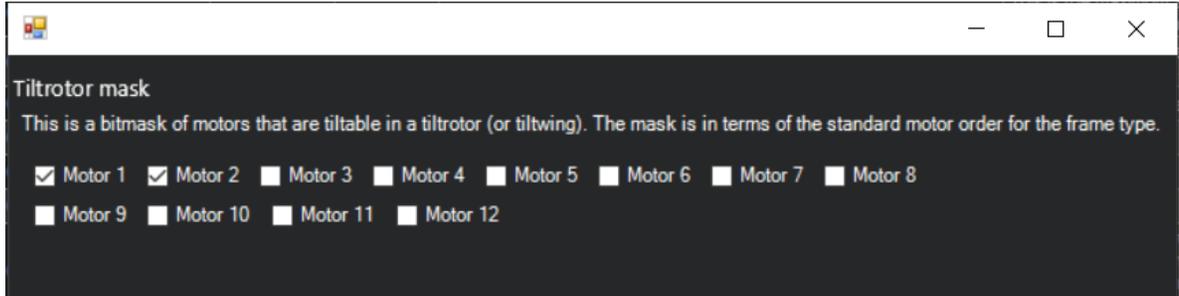


Figura 3.74. Lista seleccionable Tiltrotor mask [Autores].

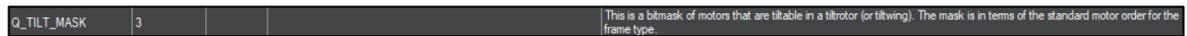


Figura 3.75. Parámetro Q_TILT_MASK [Autores].

Finalmente se configuran los parámetros que controlan los ángulos de los motores en el cambio de modo de vuelo y la potencia que tendrán los motores según las recomendaciones de los creadores del firmware. Ver Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Parámetros de los motores y sistema tiltrotors.

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
Q_TILT_FIX_ANGLE	10	deg	Ángulo de los tiltrotors con respecto al horizonte en modo de vuelo horizontal
Q_TILT_MAX	65	deg	Ángulo de inclinación al cual la aeronave cambia de modo de vuelo vertical y cambia al horizontal de ala fija
Q_TILT_RATE_DN	15	deg/s	Velocidad máxima de los servomotores en cambio de modo de vuelo vertical a horizontal
Q_TILT_RATE_UP	80	deg/s	Velocidad máxima de los servomotores en cambio de modo de vuelo horizontal a vertical
Q_TILT_THR_DN	80	%	Potencia máxima de los motores
Q_TILT_THR_UP	30	%	Potencia mínima de los motores

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Diseño mecánico del VANT con tecnología VTOL

Se logra completar el diseño de la aeronave tipo VTOL mediante software CAD, mediante el diseño de acoples y complementos respecto a las necesidades para mejorar el encaje de las piezas se logran ensamblar todas las partes individuales lo cual facilita a los diseñadores la visualización y evaluación de su forma. Adicionalmente se añaden demás elementos como motores, hélices y servomotores y el autopiloto. Ver Figura 4.1.



Figura 4.1. Diseño completo - Vista isométrica [Autores].

El diseño mecánico mostrado puede presentar cambios debido a pequeños ajustes en los diseños o a la disponibilidad de filamento al momento de realizar la impresión. El diseño mecánico final cumple con múltiples parámetros definidos como la geometría del perfil alar, la forma de las alas definida y analizada, las dimensiones del fuselaje permiten almacenar los elementos que componen el sistema electrónico y de control como se muestra en la Figura 4.2. El haber realizado el diseño en un software de diseño que permite exportar los archivos formatos estándar como el STEP permiten que las piezas puedan ser importadas en múltiples tipos de software permitiendo así cualquier tipo de manufactura para desarrollar las partes de la aeronave.

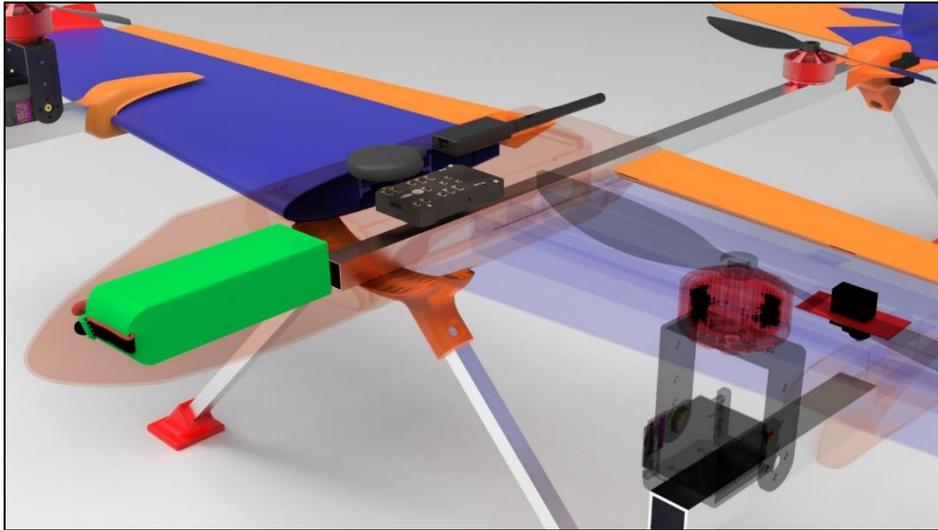


Figura 4.2. Elementos electrónicos en el diseño final [Autores].

Al añadir elementos adicionales como motores, servomotores, hélices, ESC, batería y el sistema de autopiloto en dimensiones reales se ayuda a dimensionar si las proporciones de la aeronave son las correctas. Esto se hace con el fin de asegurarse de que el diseño es viable antes de realizar la impresión de las piezas. Se pueden observar diferentes vistas de la aeronave en la Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5.

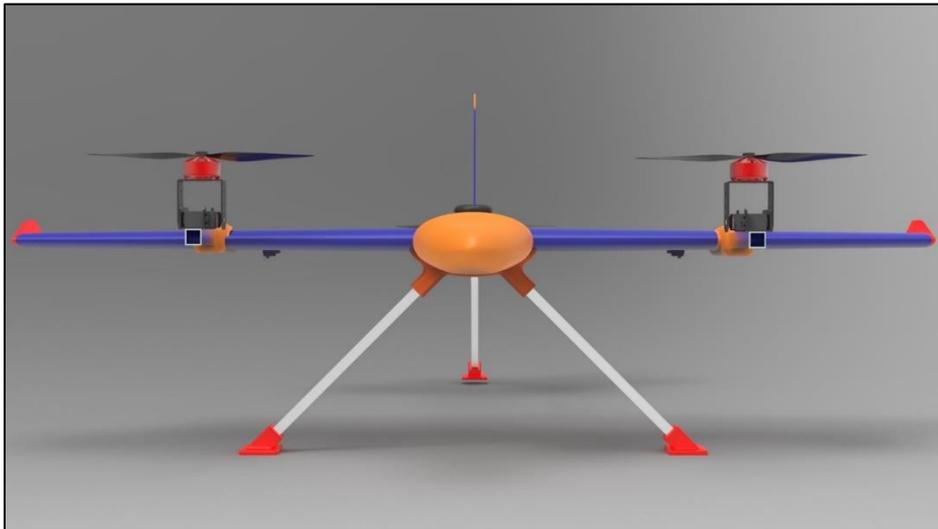


Figura 4.3. Diseño final - vista frontal [Autores].

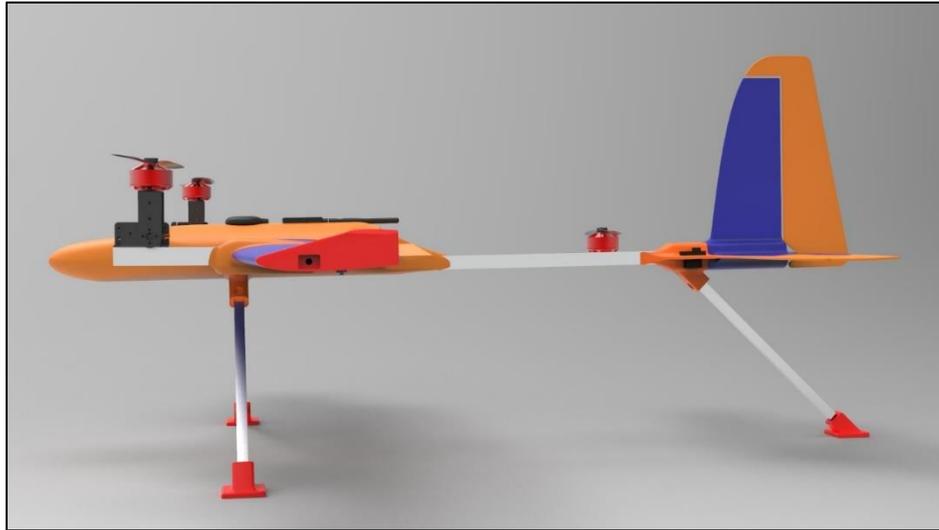


Figura 4.4. Diseño final - vista lateral [Autores].

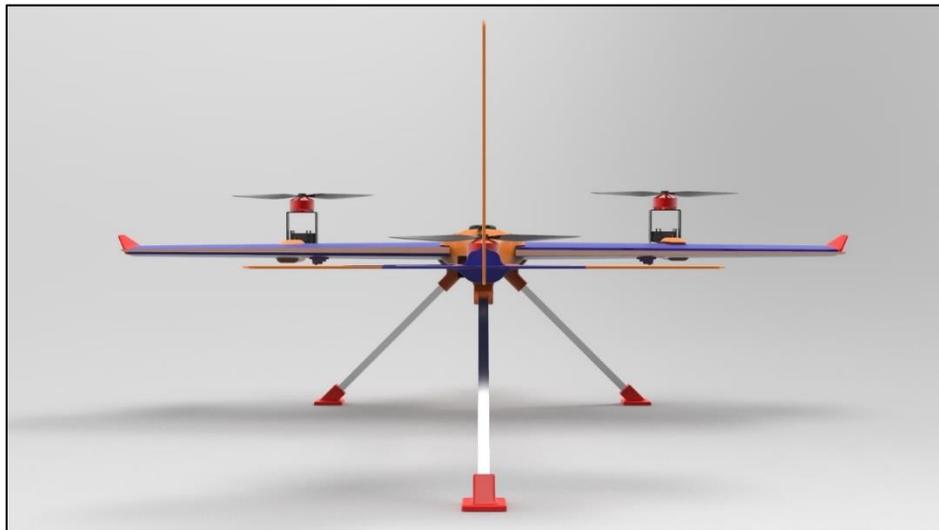


Figura 4.5. Diseño final - vista posterior [Autores].

4.2. Conexión de los sistemas electrónicos y de control

Posterior al ensamblaje de la aeronave se realizan las conexiones de los sistemas eléctricos y electrónicos que esta tiene, las conexiones de los diferentes elementos se realizan según lo indicado más atrás en la 63 en el apartado 3.5, Componentes de los sistemas de control y electrónico. Lo primero que se conecta son los periféricos de la aeronave en los que se incluyen el switch de seguridad, el buzzer, el GPS, el módulo de telemetría, el encoder PPM, el módulo 3DR y el BEC.

Luego de haber conectado los periféricos y haber verificado su funcionamiento se continúa con la conexión de los actuadores de la aeronave, los cuales son los servomotores y los ESC junto a los motores Brushless. Todos estos elementos se

conectan al servorail del autopiloto, los pines se conectan como se indica más atrás en la Tabla 3-5. La conexión de estos elementos da como resultado lo visto en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Conexiones de las salidas del servorail [Autores].

Una vez organizado el autopiloto y los cables en su posición final da como resultado lo visto en la Figura 4.7.



Figura 4.7. Autopiloto y cables dentro del fuselaje [Autores].

4.3. Validación de la configuración del autopiloto

Después de haber organizado los cables y configurar el autopiloto se realizan las pruebas de laboratorio pertinentes a la aeronave las cuales son las pruebas de los elementos móviles como servomotores y los motores brushless. Se conecta el sistema de alimentación y se enciende el radio control, los modos de vuelo se alternan con la palanca de tres posiciones que controla el canal 5. Para realizar las pruebas de los alerones, elevador y timón de dirección se coloca el modo de vuelo manual como se muestra en la Figura 4.8.



Figura 4.8. Canal de control de los modos de vuelo [Autores].

Moviendo la palanca izquierda del control hacia la izquierda y derecha se puede observar el movimiento del timón de dirección. Ver Figura 4.9.



Figura 4.9. Movimiento del timón de dirección [Autores].

Para mover el elevador se mueve la palanca derecha del control hacia arriba y hacia abajo dando como resultado lo visto en la Figura 4.10.



Figura 4.10. Movimiento del elevador [Autores].

Para verificar que el movimiento de los alerones es correcto ambos deben moverse en posiciones opuestas, así que cuando uno sube el otro baja y viceversa. El movimiento de los alerones se consigue moviendo la palanca derecha del control hacia la derecha y hacia la izquierda, su movimiento se puede ver en la Figura 4.11.



Figura 4.11. Movimiento de los alerones [Autores].

Para verificar la posición de los servomotores del sistema tilt rotors en modo de vuelo vertical se pone el modo de vuelo "QSTABILIZE", esto posicionará a los servomotores en un ángulo de 90 grados como se puede ver en la Figura 4.12.



Figura 4.12. Tilt rotors en modo QSTABILIZE [Autores].

Después se cambia al modo de vuelo horizontal que aparece en el software como “FBWA”, esto posicionaría los servomotores en un ángulo de 180 grados. Sin embargo, debido al parámetro “Q_TILT_FIX_ANGLE” que limita el ángulo al cual los servomotores llegan en el modo de vuelo horizontal estos deberían quedar en una posición de 170 grados como se muestra en la Figura 4.13.



Figura 4.13. Tilt rotors en modo FWBA [Autores].

La última prueba de la aeronave es la de los motores brushless, para llevar esto a cabo debemos tener el control RC encendido y sostener la palanca izquierda en la posición inferior derecha como se muestra en la Figura 4.14 por cinco segundos hasta que el buzzer de la aeronave emita el sonido de que se ha armado la aeronave.



Figura 4.14. Armado del autopiloto usando el control [Autores].

Una vez armado el autopiloto, si ya se han calibrado los ESC los motores deberían empezar a moverse sincronizadamente en el modo de vuelo "QSTABILIZE". Con tan solo mover un poco hacia arriba la palanca izquierda del control que funciona como acelerador de la aeronave estos deberían empezar a moverse como se muestra en la Figura 4.15.



Figura 4.15. Aeronave en modo QSTABILIZE [Autores].

Al cambiar el modo de vuelo nuevamente a horizontal "FBWA" se comprueba que los servomotores se acercan más al ángulo de 170 grados cuando el acelerador está al máximo y que si se deja de acelerar vuelven al ángulo de 90 grados como si estuvieran en vuelo vertical. Ver Figura 4.16.



Figura 4.16. Aeronave en modo FWBA [Autores].

5. CONCLUSIONES

A continuación, se mostrarán las conclusiones establecidas posterior a haber realizado el diseño, ensamblaje, configuración y pruebas de la aeronave VTOL QuadPlane hecha con manufactura aditiva.

- Con los resultados obtenidos nos percatamos de que se cumple con el objetivo general de diseñar e implementar un vehículo aéreo no tripulado con sistema de despegue y aterrizaje vertical utilizando tecnologías de manufactura aditiva. Identificando diversos inconvenientes que condujeron al rediseño de algunas piezas y a fortalecer los conocimientos, finalmente se consigue el buen funcionamiento de todos los dispositivos electrónicos con una correcta configuración.
- Usando software de diseño asistido por computador fue posible diseñar y dimensionar las piezas de la aeronave, así como también se logró exportar los archivos para su fabricación mediante impresión 3D utilizando PLA. La integración de perfiles de aluminio fortalece la estructura de la aeronave contra esfuerzos mecánicos como tracción, compresión y torsión.
- Tras las pruebas de laboratorio se corrobora la correcta configuración del autopiloto, controlando el movimiento de piezas como alerones, elevador, timón de dirección y sistema tiltrotors. Además de la aceleración de los motores Brushless en modo de vuelo vertical y la transición de vuelo a horizontal como deben hacer los QuadPlane.
- El sistema de autopiloto Pixhawk ayuda al piloto de la aeronave a controlar la aeronave con una mejor estabilidad y precisión, los sensores equipados como el giroscopio ayudan a mantener el control contra condiciones meteorológicas adversas como viento fuerte y maniobras complicadas. Además de los diferentes tipos de vuelo automático que permiten realizar las actividades con más autonomía.
- Mediante el software Mission Planner se puede realizar la configuración de la aeronave de una forma didáctica e intuitiva, la personalización permite configurar entre una amplia gama de aeronaves y esto nos permitió configurar el Tricopter según nuestras necesidades.
- Con la información suministrada en este documento, los diseños y parámetros de programación mostrados a lo largo de este proyecto, cualquier persona que quiera desarrollar otras configuraciones con aeronaves VTOL debería tener una guía para realizarlo con mucha más facilidad en caso de utilizar la Pixhawk 2.4.8.

6. RECOMENDACIONES

Después de haber desarrollado la aeronave con sistema VTOL fabricada en manufactura aditiva se pueden dictar las siguientes recomendaciones a las personas que estén iniciando en proyectos afines a todo lo mostrado en este proyecto o a quienes continúen con una nueva versión de este proyecto.

- Se recomienda continuar el desarrollo de investigaciones similares, en especial a la integración de tecnologías como la VTOL la cual demuestran una gran confiabilidad y funcionalidad.
- Si se va a integrar manufactura aditiva en la construcción de la aeronave es importante mantener una mejora continua en el diseño de las piezas. La manufactura aditiva cuenta con la capacidad para realizar modificaciones rápidas las cuales permiten disminuir el peso, optimizar el rendimiento y aumentar la eficiencia de la aeronave.
- Para exportar las piezas se recomienda el formato STEP ya que es el nuevo estándar para las piezas CAD, esto permite una mejor compatibilidad entre distintos programas de diseño, simulación de fluidos o renderizado.
- Respecto al fuselaje se recomienda aumentar el ancho y la altura de este, ya que el espacio actual es muy limitado para gestionar los cables y alguien que no tenga experiencia previa en la gestión de cables podría dañar algún cable o componente electrónico.
- Se recomienda probar diferentes configuraciones de hélices con un mayor diámetro y paso, consiguiendo así una mayor potencia en la aeronave.
- El soporte de los motores en el sistema tilt rotors carga mucho peso cuando la aeronave se eleva, una posible mejora sería implementar unos rodamientos para reemplazar el sistema de tuerca y arandela.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Perdomo Barajas, «El uso de drones en la agricultura de precisión,» 18 Agosto 2015. [En línea]. Available: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2015/08/18/el-uso-de-drones-en-la-agricultura-de-precision/#:~:text=En%20la%20agricultura%20de%20precisi%C3%B3n%2C%20la%20funci%C3%B3n%20primordial%20de%20los,recoger%20informaci%C3%B3n%20acerca%20del%20cultivo.&text=E>. [Último acceso: 7 Abril 2021].
- [2] C. R. S. I. «Colombia tiene 14 millones de hectáreas para producción agrícola,» Caracol Radio, 10 junio 2019. [En línea]. Available: https://caracol.com.co/radio/2019/06/10/nacional/1560174972_909741.html. [Último acceso: 03 mayo 2020].
- [3] A. Paz Cardona y M. L. , «Un millón de hogares campesinos en Colombia tienen menos tierra que una vaca,» 25 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.semana.com/impacto/articulo/concentracion-de-la-tierra-en-colombia-el-1-por-ciento-de-las-fincas-mas-grandes-ocupan-el-81-por-ciento-de-la-tierra/40882/>. [Último acceso: 2022 Abril 3].
- [4] P. «‘El Eje Cafetero debe buscar el desarrollo de la agroindustria’,» El Tiempo [En línea], 03 abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/el-eje-cafetero-debe-buscar-el-desarrollo-de-la-agroindustria-345264>. [Último acceso: 2020 mayo 03].
- [5] S. Ponce, «Promueven uso de drones en la agricultura,» El Heraldo de Chihuahua, 6 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.elheraldodechihuahua.com.mx/local/delicias/promueven-uso-de-drones-en-la-agricultura-8101874.html>. [Último acceso: 11 Abril 2022].
- [6] J. J. Bonilla, «Hay escasez de mano de obra para ir a coger café,» 10 septiembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/hay-escasez-mano-obra-coger-cafe-48536>.
- [7] P. G. Bejerano, «El uso de drones en agricultura,» 22 febrero 2015. [En línea]. Available: <https://www.todrone.com/uso-drones-agricultura/>.
- [8] R. A. Serway y J. W. Jewett Jr, Física para ciencias e ingeniería, Séptima ed., vol. 1, S. R. C. González, Ed., México, D.F: Cengage Learning, 2008.

- [9] Flottweg, «Viscosidad dinámica (tenacidad y coeficiente de fricción interna),» s.f. [En línea]. Available: <https://www.flottweg.com/es/wiki/tecnica-de-separacion/viscosidad-dinamica/>. [Último acceso: 14 Mayo 2021].
- [10] A. Carvajal, «Número de Reynolds: para qué sirve, cómo se calcula, ejercicios,» [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/numero-de-reynolds/>.
- [11] s.n, «FUERZAS QUE ACTÚAN EN UN AVIÓN,» s.f. [En línea]. Available: <https://aerodeporte.blogspot.com/2016/10/fuerzas-que-actuan-en-un-avion.html>. [Último acceso: 2 Enero 2022].
- [12] c. d. Wikipedia, «Sustentación,» 4 septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sustentaci%C3%B3n&oldid=118932971>.
- [13] B. Canabal Arce y J. Vives Costa, Diseño de un dron mediante técnicas CFD, Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya, Facultat de Ingeniería Mecánica, 2019.
- [14] Slideshare, «EASA PART-66 MODULE 8.2 : AERODYNAMICS,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/soulstalker/easa-part66-module-82-aerodynamics>. [Último acceso: 15 febrero 2021].
- [15] Wikipedia, «Perfil alar,» 4 Noviembre 2021. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar. [Último acceso: 11 Noviembre 2021].
- [16] S. E. Roncero y F. G. Jiménez, «Aeronaves y Vehículos Espaciales,» 2009 - 2010. [En línea]. Available: [http://www.aero.us.es/AVE/archivos/Y0910/Tema4_parte2\(WEB\).pdf](http://www.aero.us.es/AVE/archivos/Y0910/Tema4_parte2(WEB).pdf). [Último acceso: 20 Mayo 2021].
- [17] O. d. Cumuloninbo, «La carga alar,» 1 septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/09/la-carga-alar.html>.
- [18] Gradient, «DRON, RPA, RPAS, UAS y UAV: ¿Qué son y en qué se diferencian?,» 21 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.gradient.org/blog/dron/>. [Último acceso: 8 Mayo 2021].
- [19] European Parliament, «Civil and military drones,» Octubre 2019. [En línea]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/642230/EPRS_BRI\(2019\)642230_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/642230/EPRS_BRI(2019)642230_EN.pdf). [Último acceso: 5 Abril 2021].
- [20] M. Ball, «UK MoD Orders First Protector UAVs,» 17 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2020/07/uk-mod-orders-first-protector-uavs/>. [Último acceso: 28 Febrero 2021].

- [21] R. Adeva, 11 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.adslzone.net/reportajes/drones/tipos-drones/>. [Último acceso: 2021 Marzo 4].
- [22] Helicopter History Site, «Tiltrotors,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.helis.com/types/tiltrotor.php>. [Último acceso: 23 Noviembre 2022].
- [23] C. McGrady y A. E. , «¿Con o sin escobillas? ¿Qué motor de CC debería elegir?,» 18 Enero 2016. [En línea]. Available: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/which-dc-motor-is-best-for-your-application>. [Último acceso: 21 02 2021].
- [24] De Maquinas Y Herramientas, «¿QUÉ ES LA TECNOLOGÍA BRUSHLESS (SIN CARBONES) Y QUÉ VENTAJAS TIENE?,» 2 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/tecnologia-brushless-sin-carbones-intro>. [Último acceso: 4 Abril 2021].
- [25] Prometec, «LO QUE HAY QUE SABER PARA ELEGIR LOS MOTORES PARA UN CUADRACÓPTERO,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.prometec.net/elegir-motores-cuadracoptero/>. [Último acceso: 4 Abril 2021].
- [26] O. E. Alarcon Balseca y M. C. Rodriguez Lacruz, Controlador electrónico de velocidad para cuatro motores sin escobillas de un dron, Madrid: Escuela Técnica Superior De Ingeniería Y Sistemas De Telecomunicaciones, s.f.
- [27] L. Eitel, «Brushless dc motors for industrial power tools: Comparison of options including slotless motor variations,» 5 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.motioncontroltips.com/motors-industrial-power-tools-comparison-of-brushless-dc-options-including-slotless-motor-variations/>. [Último acceso: 4 Abril 2021].
- [28] DonProfesional, «Qué debes conocer de las baterías LiPo,» 1 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://dronprofesional.com/blog/que-debes-conocer-de-las-baterias-lipo/>. [Último acceso: 8 Abril 2021].
- [29] Prometec, «LO QUE HAY QUE SABER PARA ELEGIR LAS HÉLICES PARA UN CUADRACÓPTERO,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.prometec.net/elegir-helices-dron/>. [Último acceso: 5 Abril 2021].
- [30] Mobus Drones, «ESC para drones, ¿para qué sirven?,» 26 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://mobus.es/blog/esc-para-drones-para-que-sirven/>. [Último acceso: 13 Noviembre 2021].

- [31] Y. Kang, Y. Y. Guang y H. F. S. Isi, Research of Control System for Plant Protection UAV Based on Pixhawk, Wuhan, China: Hubei University of Technology, 2020.
- [32] Dronecode Fundation, «Pixhawk Wiring Quick Start,» 12 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://docs.px4.io/master/en/assembly/quick_start_pixhawk.html. [Último acceso: 30 Mayo 2021].
- [33] ArduPilot, «Docs, ArduPilot,» 21 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/ardupilot/>. [Último acceso: 21 Febrero 2022].
- [34] G. Gridling y B. Weiss , Introduction to Microcontrollers, Viena: Vienna University of Technology, 2007.
- [35] R. Maluenda de Vega, «Qué es un algoritmo informático,» s.f. [En línea]. Available: <https://profile.es/blog/que-es-un-algoritmo-informatico/>. [Último acceso: 2021 Abril 6].
- [36] Embention, «MODOS DE CONTROL COMUNES Y AVANZADOS CON UAVS,» 9 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.embention.com/es/news/modos-de-control-con-uavs/>. [Último acceso: 8 Abril 2021].
- [37] Siemens, «Diseño asistido por ordenador (CAD),» s.f. [En línea]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>. [Último acceso: 12 Abril 2021].
- [38] SOLIDWORKS LATAM y España, «SOLIDWORKS 3D CAD 2022 ya está aquí: Descubra las principales mejoras ahora,» 22 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/disenosolidworks-3d-cad-2022-ya-esta-aqui-descubra-las-principales-mejoras-ahora/>. [Último acceso: 26 Julio 2022].
- [39] Autodesk, «Inventor: software eficaz de diseño mecánico para sus proyectos más ambiciosos,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.autodesk.es/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>. [Último acceso: 26 Julio 2022].
- [40] Dassault Systèmes, «Productos y servicios: CATIA,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>. [Último acceso: 26 Julio 2022].
- [41] Autodesk, «Unifica el diseño, la ingeniería, la electrónica y la manufactura con Fusion 360,» s.f. [En línea]. Available:

<https://latinoamerica.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>. [Último acceso: 27 Julio 2022].

- [42] I. Gibson, D. Rosen y B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, New York: Springer, 2015.
- [43] Impresoras3D.com, «Breve Historia de la impresión 3D,» 1 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>.
- [44] F. Díaz del Castillo Rodriguez, IMPRESIÓN 3D, UNA INTRODUCCIÓN, Ciudad de Mexico: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO, 2018.
- [45] Formlabs, «Comparación de tecnologías de impresión 3D: FDM, SLA o SLS,» 23 Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://formlabs.com/latam/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adecuada/>. [Último acceso: 14 Julio 2022].
- [46] Abigail, «What Is FDM 3D Printing? Advantages and Disadvantages,» 26 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.wenext.com/blog/fdm-3d-printing>. [Último acceso: 14 Julio 2022].
- [47] J. Peels, «Bluesint: Materialise Now Able to Recycle 100% of Sintering Powder for SLS 3D Printing,» 18 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://3dprint.com/275931/bluesint-materialise-now-able-to-recycle-100-of-sintering-powder-for-sls-3d-printing/>. [Último acceso: 15 Julio 2022].
- [48] A. Locker, «Slicer 3D: los mejores softwares de corte de 2021,» 10 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://all3dp.com/es/1/slicer-3d-programa-corte-impresora-3d/>. [Último acceso: 15 Julio 2022].
- [49] J. Horvath, Mastering 3D Printing, Pasadena, California: TECHNOLOGY IN ACTION™, 2014.
- [50] 3DWorks, «Altura de Capas y Resolución en la Impresión 3D,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.3dworks.cl/post/altura-de-capas>. [Último acceso: 24 Julio 2022].
- [51] A. Marchante, «¿Cómo se utiliza la impresión 3D con materiales de más exigencia en la aeronáutica?,» 30 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-materiales-aeronautica-300620212/>. [Último acceso: 24 Julio 2022].
- [52] E. Oliver, «Te mostramos la historia de los drones con lujos y detalles,» 20 diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://es.digitaltrends.com/drones/la-historia-de-los-drones/>.

- [53] C. Rus, «El VTOL de Airbus ya vuela a más de 90 km/h y lo podemos ver en vídeo despegando y aterrizando en vertical,» Xataka [En línea], 26 febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/automovil/vtol-airbus-vuela-a-90-km-h-podemos-ver-video-despegando-aterrizando-vertical>. [Último acceso: 04 mayo 2020].
- [54] El País, «Airbus presenta el primer avión impreso en 3D del mundo,» 6 Junio 2016. [En línea]. Available: https://elpais.com/elpais/2016/06/06/ciencia/1465226623_188095.html. [Último acceso: 9 Enero 2022].
- [55] Colombia. Aeronáutica Civil, Resolución No. 04201 del 27 de Diciembre, Bogotá: Diario Oficial, 2018.
- [56] CONtexto ganadero, «En Colombia se consolida el uso de drones para fertilizar y fumigar,» 27 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.contextoganadero.com/agricultura/en-colombia-se-consolida-el-uso-de-drones-para-fertilizar-y-fumigar#:~:text=En%20Colombia%20se%20consolida%20el%20uso%20de%20drones%20para%20fertilizar%20y%20fumigar&text=En%20el%20marco%20de%20Expo,gran%20ahor>. [Último acceso: 7 Mayo 2021].
- [57] CIAC, «UAV COELUM Sistema remotamente tripulado,» s.f. [En línea]. Available: <https://www.ciac.gov.co/productos-y-servicios/disenoy-desarrollo/uav-coelum/>. [Último acceso: 14 Noviembre 2021].
- [58] Artillery, «ARTILLERY SIDEWINDER X1,» s.f. [En línea]. Available: <https://artillery3d.es/artillery-sidewinder-x1/>. [Último acceso: 5 Agosto 2022].
- [59] Radiolink Electronic Ltd, PIXHAWK User Manual, s.n: Radiolink Electronic Ltd, s.f.
- [60] Alldatasheet.com, «MG995 High Speed Servo Actuator,» s.f. [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132435/ETC2/MG995.html>. [Último acceso: 12 Mayo 2023].
- [61] Magic Power Toy&Hobby Co.,Ltd, «Microzone-sistema de Control remoto para avión, transmisor de 6 canales, 2,4G, MC6-C, receptor,» s.f. [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/32888385334.html?gatewayAdapt=glo2esp>. [Último acceso: 14 Diciembre 2022].
- [62] FinWingHobby, «XUWING VT BIRD Tilt Rotor kits + Power Combo,» s.f. [En línea]. Available: <https://finwinghobby.com/goods.php?id=165>. [Último acceso: 10 Mayo 2023].

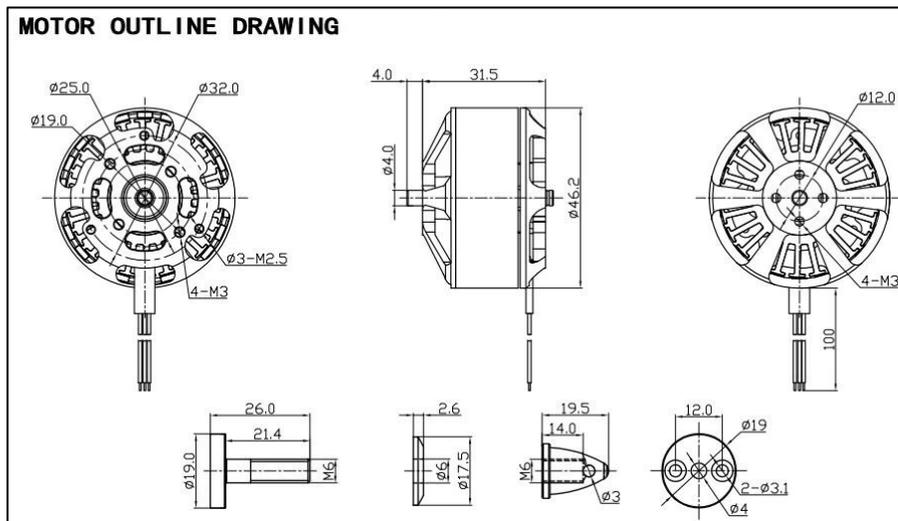
- [63] ArduPilot, «Airframes Reference,» s.f. [En línea]. Available: https://docs.px4.io/main/en/airframes/airframe_reference.html. [Último acceso: 10 Mayo 2023].
- [64] ArduPilot, «QuadPlane Frame setup,» s.f. [En línea]. Available: <https://ardupilot.org/plane/docs/quadplane-frame-setup.html>. [Último acceso: 10 Mayo 2023].
- [65] Banggood, «4X Racerstar Racing Edition 4114 BR4114 400KV 4-8S Motor Sin escobillas Para 600 650 700 800 RC Drone FPV Racing,» s.f. [En línea]. Available: https://usa.banggood.com/4X-Racerstar-Racing-Edition-4114-BR4114-400KV-4-8S-Brushless-Motor-For-600-650-700-800-RC-Drone-FPV-Racing-p-1124378.html?cur_warehouse=CN. [Último acceso: 24 Noviembre 2022].
- [66] Makerfire, «HakRC 4pcs BLHeli_32 35A ESC 32Bit,2-5S Battery Input, Support Dshot,» s.f. [En línea]. Available: https://shop.makefire.com/products/crazepony-4pcs-blheli_32-35a-esc-32bit-2-5s-battery-input-support-dshot. [Último acceso: 24 Noviembre 2022].
- [67] HobbyKing, «Multistar de alta capacidad de 5200mAh 6S Multi-Rotor Lipo Paquete,» s.f. [En línea]. Available: https://hobbyking.com/es_es/multistar-high-capacity-6s-5200mah-multi-rotor-lipo-pack.html. [Último acceso: 25 Noviembre 2022].
- [68] AliExpress, «Módulo de potencia APM de alta calidad, amperímetro de 5,3 V CC BEC XT60 conectores para APM 2.5.2 RC, accesorio de suministro de batería,» s.f. [En línea]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/1005002367208342.html?gatewayAdapt=glo2esp>. [Último acceso: 25 Noviembre 2022].
- [69] FoxTech, «ASSAN UBEC-8A(2-10S),» s.f. [En línea]. Available: <https://www.foxtechfpv.com/assan-ubec-8a-2-10s.html>. [Último acceso: 26 Mayo 2023].

8. ANEXOS

MOTOR PERFORMANCE DATA									
MODEL	KV (rpm/V)	Voltage (V)	Prop	Load Current (A)	Pa11 (g)	Power (W)	Efficiency (g/W)	Lipo Cell	Weight (g) Approx
BR4114	340	22.2	APC1447	17.0	2430	377	6.5	4-12S	142
			1555CF	16.5	2320	366	6.3		
	400	14.8	17x4	16.2	1820	240	7.6	4-8S	
			18x5	18.1	2100	268	7.8		
			1555CF	22.6	2780	502	5.5		
			17x4	25.5	2920	566	5.2		

Descripción:
 Marca: Racerstar
 Nombre del artículo: BR4114 400KV Brushless Motor
 RPM / V: 400KV
 Altura: 35.5mm
 Ancho: $\phi 46.2$ mm
 Diámetro del árbol: $\phi 4.0$ mm
 Tamaño del agujero del montaje del motor: 4-M3
 Peso: 142 gramos
 Voltaje: 4-8S
 Batería: batería de lipo 4-8S
 Longitud del cable: 100mm
 Uso: 600-800 clase Marco Kit
 Probado con 22,2V de voltaje 17x4 hélices:
 Corriente de carga: 25.5A
 Tirar: 2920g
 Potencia: 566W
 Eficiencia: 5.2 (g / W)

Anexo 1. Datasheet motor Racerstar BR4114 [65].



Anexo 2. Planos del motor Racerstar BR4114 [65].

Specification:

Item name: BLHeli32 bit 35A ESC

Firmware: BLHeli32 bit

MCU: STM32F051

Con. current: 35A

Input voltage: 2-5s lipo

PCB: 3OZ copper, Gold-plated

Size: 26x13x5 mm

Weight: 7g

Support 500HZ PWM, Oneshot125, Oneshot42, Multishot, Dshot150, Dshot300, Dshot600, Dshot1200

Anexo 3. Especificaciones ESC BLHeli_32 35A [66].

Especificaciones:

Capacidad mínima: **5200mAh**

Configuración: **6S1P / 22.2V / 6Cell**

Descarga constante: **10C**

Descarga máxima (10 seg): **20C**

Peso del paquete: **643g**

Tamaño del paquete: **142 x 49 x 43 mm**

Carga del enchufe: **JST-XH**

Enchufe de descarga: **XT60**

Anexo 4. Especificaciones Batería Li-Po MULTISTAR 5200mAh [67].

Especificaciones:

- Voltaje máximo de entrada: 30V
- Detección de corriente máxima: 90a
- Medición de voltaje y corriente configurada para 5V ADC
- Salidas del regulador de conmutación 5,3 V y 2,25a máx.
- El cable 6-pos DF13 se conecta directamente al conector APM 2,5's pm'

Anexo 5. Especificaciones módulo de potencia 3DR [68].

Specification:
 Input voltage: 9V-42V(3-10S LiPo)
 Output voltage: 5.2V, 6.0V,7.4V, 8.4V adjustable
 Output Current: 8A(continuous), 16A(Peak)
 Size:51x36x8mm
 Weight:32g

Features:
 -It adopted the advanced DC-DC regulator chip with conversion efficiency exceeds 90%.
 -4 options for the output voltage, applicable for all kinds of receivers/gyros/servos,etc.
 -2 cables are connected in parallel at the output end of the UBEC, allow larger current to flow into the receiver.
 -It featured over-current protection, short-circuit protection(at the output end) and reliable.
 -the external switch can turn on/off the UBEC easily.
 -It has one status LED, which lights up when the UBEC works normally.

Anexo 6. Especificaciones UBEC Assan 42V 8A [69].

