

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (UAV) CON  
SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICO PARA DESPEGUE Y  
ATERRIAJE VERTICAL (VTOL)**

**DIMENSIONAMIENTO Y ENSAMBLAJE DE UN SISTEMA DE  
PROPULSIÓN ELÉCTRICO PARA UN UAV TIPO VTOL DE  
CONFIGURACIÓN TIPO TRICÓPTERO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MÉCANICA**

**SANTIAGO DANIEL RIVERA PADILLA**

**santiago.rivera01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES**

**esteban.valencia@epn.edu.ec**

**DMQ, agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Santiago Daniel Rivera Padilla declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**SANTIAGO DANIEL RIVERA PADILLA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Santiago Daniel Rivera Padilla, bajo mi supervisión.

---

**ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Santiago Daniel Rivera Padilla

Esteban Alejandro Valencia Torres

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado de manera especial a todas las personas que depositaron su confianza en mí y creyeron en mi capacidad para alcanzar mis metas. Quiero mencionar de manera especial a mi madre, Olivia Padilla, quien no solo me dio la vida, sino que también me brindó su amor incondicional en cada instante. A través de su propio ejemplo, me inculcó sus valores y me demostró que sin importar cuán desafiante sea el obstáculo, la perseverancia y la determinación me permitirán alcanzar mis objetivos. Sus palabras de aliento diarias se convirtieron en mi fuente de energía para nunca rendirme, quiero que sepas que te amo infinitamente madre. Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi padre, Dennys Rivera, por su constante apoyo y por brindarme la confianza para tomar mis propias decisiones. Siempre estuvo a mi lado, guiándome hacia el camino del bien y demostrando con entusiasmo su admiración por mí. Su fortaleza y nobleza han sido ejemplos inspiradores para mí, y espero algún día alcanzar la misma grandeza que él ha demostrado. A mi hermana, Camila Rivera, le dedico un lugar especial en esta mención. Desde mi infancia, ella ha sido mi inspiración para convertirme en un mejor ser humano. Es un orgullo para mí saber que cada paso que da, deja una huella más profunda que la mía. Espero que este trabajo pueda servir de motivación para que alcances tus metas y llegues aún más lejos. Deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi hermano, Renato Rivera, por ser mi compañero fiel e inquebrantable en la vida. Sus sonrisas y ocurrencias han iluminado mi camino, y me siento verdaderamente afortunado de tenerlo en mi vida. Valoro la honestidad con la que compartes tus pensamientos y la confianza que has depositado en mí, quiero que sepas que siempre estaré contigo y con Camila, para apoyarlos y cuidarlos, porque ante mis ojos solo deslumbra la ternura de cuando eran bebés y los cargaba en mis brazos. Finalmente quiero agradecer a la persona que más me ha enseñado durante mi corto tiempo en la universidad, quien me brinda su amistad sincera y ahora es mi novia, quiero que sepas que eres parte de mi familia y que siempre velaré por tus sentimientos, tal como tú lo has hecho por los míos. Junto a ti, he compartido cientos de momentos preciosos y estoy emocionado por los miles más que nos aguardan en el futuro. Agradezco profundamente que nunca te hayas rendido conmigo y por brindarme tu apoyo constante. Te amo.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios.

A mi madre, padre y hermanos quienes han sido pilares fundamentales en este logro académico, les agradezco de todo corazón porque día a día me motivaron para seguir adelante. No solo me ayudaron en la construcción del dron, sino que también compartieron su entusiasmo y admiración por mi trabajo, lo cual significó todo para mí.

A Nathaly Aguilar, mi compañera incondicional a lo largo de mi vida universitaria, le debo un agradecimiento especial por su constante apoyo, por enseñarme nuevas perspectivas y por estar a mi lado en cada etapa de este desafío.

A mi familia por el constante apoyo e interés en mí, en especial mi tío Fernando Polanco quien con su experiencia me ayudo a perfeccionar el desarrollar del dron.

Al PhD. Esteban Valencia por brindarme la oportunidad de desarrollar el tema de este trabajo de integración curricular y así aportar más conocimiento a mi preparación profesional.

Al ingeniero Víctor Alulema por ser un buen guía en la elaboración del dron, además de brindarme su apoyo y paciencia para la realización del trabajo de titulación.

A mis amigos, quienes siempre estuvieron ahí para brindarme su apoyo inquebrantable y palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante.

A todos los compañeros que confiaron en mí y me extendieron su mano cuando lo necesité.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT .....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	2
1.1 Planteamiento del problema .....	2
1.2 Objetivo general .....	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Alcance.....	3
1.5 Marco teórico.....	3
Historia .....	3
Fixed Wing (ala fija) .....	4
Multicopter (multirotor).....	5
VTOL.....	7
1.6 Contribución del trabajo.....	8
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Configuración base del UAV VTOL.....	10
2.2 Rediseño de la estructura del UAV VTOL.....	13
Selección del material estructural .....	13
Fabricación de los elementos del UAV VTOL .....	14
Recubrimiento .....	18
Acabado superficial .....	20
2.3 Matriz de selección de mecanismos .....	21
2.4 Rediseño del mecanismo tilting para el UAV VTOL .....	25
Caja portadora del servomotor.....	25
Mecanismo de rotación.....	26
Reubicación tilting alas .....	26
Diseño de estructura y ubicación de tilting para la cola.....	27
Reubicación del elevador.....	28

2.5	Rediseño del sistema de propulsión .....	29
	Banco de pruebas con motores y propelas .....	29
2.6	Ensamblaje del UAV VTOL.....	32
	Unión cola y fuselaje.....	32
	Implementación de dispositivos electrónicos .....	33
	Unión fuselaje y alas.....	34
3	RESULTADOS .....	35
3.1	Dimensiones y masas finales .....	35
3.2	Gráficas de motores y propelas .....	36
3.3	Metodología de selección .....	43
3.4	Selección de componentes del sistema de propulsión.....	44
	Motor .....	44
	Propela .....	45
	Batería.....	46
3.5	Diseño Final.....	47
4	CONCLUSIONES .....	48
5	RECOMENDACIONES.....	49
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
7	ANEXOS.....	53
	ANEXO I: BANCO DE PRUEBAS MOTORES Y PROPELAS .....	53

## RESUMEN

El prototipo existente en el laboratorio presenta un exceso de peso debido a su recubrimiento de fibra híbrida de carbono y kevlar, lo que dificulta el despegue del UAV VTOL y su autonomía, además se evidencia problemas en el mecanismo tilting. Para lo que se plantea un cambio de material para la estructura y la reubicación de recubrimiento, para solucionar el problema de sobrepeso, y a su vez rediseñar el sistema de propulsión eléctrico para garantizar un mejor despegue, también por requerimiento del laboratorio se colocará un mecanismo tilting en la cola. Esto se realizó con la fabricación del prototipo con XPS para la estructura y la colocación de fibra de vidrio localizada en los perfiles débiles del UAV VTOL, por otro lado, se realizó un banco de pruebas para la selección de motor y propela. Obteniendo como resultados una disminución de peso aproximado de 2033 [g] lo que representa un 282% en comparación con el diseño preexistente, además el motor T-motor am480 kv650 con la propela 13 x 8 E funcionan correctamente con el 50% de aceleración del motor generando un empuje total de 4995 [g] con sus 3 motores. Concluyendo que se disminuyó el peso del prototipo de este proyecto y a su vez se mejoró el sistema de propulsión eléctrico con la selección del motor T-motor am480 kv650 y la propela 13 x 8 E junto con el mecanismo tilting implementado.

**PALABRAS CLAVE:** UAV, VTOL, tilting, fibra híbrida, fibra de vidrio, XPS.

## **ABSTRACT**

The existing prototype in the laboratory is overweight due to its hybrid carbon and kevlar fiber coating, which hinders the UAV VTOL's takeoff and its autonomy. Additionally, there are issues with the tilting mechanism. To address these issues, a material change for the structure and a relocation of the coating are proposed to solve the weight problem. Simultaneously, a redesign of the electric propulsion system is planned to ensure better takeoff performance. Furthermore, in accordance with the laboratory's requirements, a tilting mechanism will be installed at the tail. This was accomplished by constructing the prototype using XPS for the structure and placing fiberglass in the weak sections of the UAV VTOL. Additionally, a test bench was set up to select the motor and propeller. The results show an approximate weight reduction of 2033 [g], representing a 282% improvement compared to the preexisting design. Moreover, the T-motor am480 kv650 motor with the 13 x 8 E propeller operates correctly at 50% throttle, generating a total thrust of 4995 [g] with its three motors. In conclusion, the weight of this project's prototype has been reduced, and the electric propulsion system has been improved with the selection of the T-motor am480 kv650 motor and the 13 x 8 E propeller, along with the implemented tilting mechanism.

**KEYWORDS:** UAV, VTOL, tilting, hybrid fiber, fiberglass, XPS.

## INTRODUCCIÓN

Los UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), conocidos como dron, son vehículos aéreos controlados por control remoto los cuales pueden ser pilotados de forma manual o automática estableciendo una misión de vuelo. Su importancia radica en la gran variedad de usos y facilidad de transporte aéreo que tienen los mismos, lo que se traduce en una gran capacidad de acceso a terrenos con geografía complicada sin exponer vidas humanas y en un tiempo más corto. [1]

Los drones han ganado popularidad debido a sus diversas aplicaciones, especialmente en ámbitos militares y policiales. También destacan en la entrega segura de suministros en situaciones de riesgo y misiones de búsqueda y rescate, vigilancia de áreas peligrosas, exploración y mapeo detallado del terreno, inspecciones agrícolas de precisión para el monitoreo de cultivos y detección temprana de enfermedades. Su utilidad sigue en aumento, con nuevos campos emergentes como la logística de entrega de paquetes y la captura de impresionantes imágenes aéreas en la industria del entretenimiento. [2]

Para las aplicaciones ya mencionadas se usa 3 tipos de drones: fixed wing (ala fija) capaces de recorrer largas distancias a gran velocidad y autonomía, no obstante, su movimiento se limita hacia adelante por lo que no puede flotar en el aire y requiere de una pista de vuelo para su despegue; los multicopter pueden mantenerse estáticos en el aire, elevarse grandes alturas con un despegue vertical y moverse en todos sus ejes, sin embargo, la capacidad de carga útil está limitada y el tiempo de vuelo oscila entre los 20 a 30 minutos; finalmente se tiene a los VTOL los cuales básicamente son configuraciones híbridas de los 2 modelos anteriores, estos buscan potenciar y unificar las mejores cualidades de ambos en un solo modelo. [3]

Por lo tanto, se ha optado por utilizar un VTOL como punto de partida en el diseño del prototipo de este proyecto el cual se designará "prototipo mejorado". Estas aeronaves exhiben ventajas superiores a las mencionadas previamente, gracias a su capacidad de despegue y aterrizaje en áreas de complicado acceso, su excelente rendimiento en vuelo, autonomía, capacidad de carga, alcance de largas distancias y continuas innovaciones; lo convierten actualmente en el modelo más versatilidad para la gran variedad de aplicaciones existentes.

# **1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO**

## **1.1 Planteamiento del problema**

El uso de drones en Ecuador surgió hace varios años, pero no fue hasta 2020 que se formalizó con un reglamento que permita el RPA (aeronaves pilotadas a distancia), esto dio paso a una reciente creciente demanda en el mercado para sus múltiples aplicaciones.

Ecuador al ser un país agricultor en vías de desarrollo, destaca por su actividad en la agricultura y mapeo principalmente. Por un lado, el mercado se ha abastecido de ciertos productos que brindan las prestaciones requeridas; por otro lado, instituciones públicas y privadas desarrollan sus propios modelos.

Este proyecto complementa la investigación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO DE ALA FIJA (UAV) CON UN SISTEMA DE DESPEGUE Y ATERRIZAJE VERTICAL (VTOL)” realizada por Quinteros Calispa Mauricio Antonio y Sarango Diaz Juan Carlos. Principalmente se precisa perfeccionar su diseño el cual se encuentra en el laboratorio de LUAS (Laboratorio de Sistemas Aéreos No Tripulados) del grupo de investigación ATA-EPN de la Escuela Politécnica Nacional.

Específicamente se busca disminuir el peso de la aeronave con ello se puede llevar más payload y aumentar la autonomía del dron, agregando a lo anterior se va a diseñar un mecanismo que permita rotar con rigidez y precisión al servomotor, de esta forma se tiene una mejor transición de vuelo y estabilidad. Finalmente, se añadirá un tercer tilting en la cola por requerimiento del laboratorio.

## **1.2 Objetivo general**

Dimensionamiento y ensamblaje del sistema de propulsión eléctrico de un UAV con aterrizaje y despegue vertical (VTOL) de configuración tipo tricóptero.

## **1.3 Objetivos específicos**

1. Recopilar información correspondiente a un UAV VTOL.
2. Dimensionar el sistema de propulsión eléctrico de un UAV VTOL tipo tricóptero.
3. Dimensionar la estructura de montaje de un UAV VTOL tipo tricóptero.
4. Ensamblar el UAV VTOL tipo tricóptero

## 1.4 Alcance

El alcance del proyecto abarca desde la recopilación bibliográfica hasta la fabricación y ensamblaje del prototipo mejorado. Dentro de esto se va a disminuir el peso de la estructura del UAV VTOL usando materiales menos densos, se va a diseñar un mecanismo tilting simplificado, identificar el motor y propela adecuados para generar la potencia y empuje requeridos por el dron; y diseño de piezas mecánicas las cuales brindan mejor soporte a las componentes y permiten un movimiento más preciso, de igual forma estas servirán para permitir un ensamblaje preciso y rígido.

## 1.5 Marco teórico

### Historia

Los UAVs se crearon con objetivos militares a finales del siglo XIX, inicialmente se destinaba su uso al ataque con munición y explosivos, pero con el paso de los años fueron destinadas diversas tareas como: espionaje y obtención de fotografías aéreas para la creación de mapas, con esto se tenía una ventaja sobre el enemigo en cuanto a la planificación de futuros ataques [4]. Para 1930 Estados Unidos desarrollo el primer UAV radiocontrolado y en la segunda guerra mundial crearon el primer dron por control remoto llamado Radio plane OQ-2 mostrado en la Figura 1.1. El cual fue el primer dron producido en masa y repartido a los militares para su uso en la guerra, dando paso a futuros desarrollos. [5]



Figura 1.1. Radio plane OQ-2 / Fuente: [5]

Para 1990 surgieron UAVs en miniatura y micro, y en 2000 Estados Unidos desplegó el dron Predator en Afganistán. En 2014, Amazon propuso utilizar UAVs para entregar paquetes a los clientes. Esta idea se extendió a otras tiendas minoristas que buscan reducir la distancia entre ellas y los clientes [6]. Actualmente existe gran variedad de modelos disponibles en el mercado para todo uso y con precios accesibles.

## Tipos de UAVs

En la actualidad existen 3 tipos de drones: ala fija, multirotor y VTOL. Sin embargo, en los últimos años se ha desarrollado derivados de los mismos y algunas configuraciones híbridas que se ponen a prueba para estudiar su viabilidad y cumplimiento de necesidades. A continuación, se muestra su clasificación:

### Fixed Wing (ala fija)

Es un dron cuya apariencia física asemeja a la de un avión además de que vuela como uno como se muestra en la Figura 2.2. Su nombre viene dado por la forma y posición en la que están ubicadas sus alas. Su principal característica es que usa la aerodinámica y sustentación de sus alas para mantenerse en el aire, por esta razón su autonomía es mayor que la de otros UAVs cubriendo áreas extensas de vuelo a buena velocidad. Algunos de su tipo necesitan solo de un motor el cual le da la potencia para avanzar y con el uso de sus alas mantiene un vuelo pasivo. Este tipo de dron puede despegar de 2 formas la primera es con una pista en donde debe alcanzar la velocidad necesaria para alzarse y la segunda es con una catapulta o lanzamiento manual que le dará el primer impulso para elevarse. Su principal inconveniente es que requieren pista de despegue y aterrizaje, limitando su operación en áreas con espacio reducido. También tienen menor maniobrabilidad y no pueden despegar ni aterrizar verticalmente, lo que limita su adaptabilidad en lugares con espacio limitado. Consumen más energía en vuelo estacionario y necesitan áreas de almacenamiento y transporte más grandes debido a su diseño. Operar en condiciones climáticas adversas puede ser complicado, ya que son más sensibles al viento debido a su diseño aerodinámico. Además, su pilotaje suele requerir habilidades más avanzadas, aunque son ideales para vuelos de larga distancia y grandes áreas de cobertura, pueden resultar menos adecuados en entornos urbanos o en situaciones que demandan maniobrabilidad precisa y despegue vertical. [7]



Figura 2.2. Fixed wing / Fuente: [7]

### **Multicopter (multirotor)**

Este UAV está compuesto por el cuerpo central y los brazos los cuales conservan el mismo ángulo de separación entre los mismos, el nombre del dron dependerá del número de rotores que se ubican uno en cada brazo. En general tienen una mayor facilidad para ingresar en zonas de difícil acceso, esto se debe a su aterrizaje/despegue vertical y la fácil maniobrabilidad de arriba abajo, derecha a izquierda, rotación sobre ejes. Además, es capaz de llevar cargas útiles y suspenderse en el aire [8]. Sin embargo, su velocidad es limitada al igual que su tiempo de vuelo, el simple hecho de ir en contra de la gravedad para elevar al dron y mantenerlo en el aire requiere un gran consumo energético lo que significa 20 o 30 minutos de vuelo [9], definitivamente una gran limitación a la hora de hacer misiones. Se clasifican en:

### **Tricopters (3 rotores)**

Esta configuración tiene 3 brazos separados  $120^\circ$  entre sí como se muestra en la Figura 2.3. Al ser el más simple en esta división tiene el precio más bajo, del mismo modo sus 3 rotores representan un menor peso y la duración de su batería mayor que sus hermanos. No obstante, son vulnerables ya que sus 3 motores no brindan una buena estabilidad, su manejo es complejo y en caso de un fallo o accidente difícilmente sobrevivirá. [10]



Figura 2.3. Tricopter / Fuente: [10]

### **Quadcopters (4 rotores)**

En la Figura 2.4. se observa la configuración más usada hoy en día, al tener sus 4 brazos separados  $90^\circ$  tiene una gran estabilidad. Así mismo dado que el centro de gravedad coincide con la mitad del dron el torque generado en sus rotores es simétrico lo que se traduce en un fácil manejo en cualquier dirección. Al ser tan comercial la reparación de los mismos es económica y los costos de adquisición variados al igual que sus modelos. Sin embargo, resultan engañosos a la hora de un fallo pues pierden rápidamente equilibrio y caen. [10]



Figura 2.4. Quadcopter / Fuente: [10]

### **Hexacopters (6 rotores)**

Dado que tiene 6 rotores puede despegar verticalmente más rápido y alto que los 2 anteriores, y soportar una carga mayor como se ve en la Figura 2.5. Además, si uno de sus rotores falla puede seguir funcionando con sus 5 restantes, pero si llegase a fallar uno más no podría continuar. Por otro lado, al necesitar tanta energía para alimentar al sistema la autonomía del dron disminuye. [11]



Figura 2.5. Hexacopter / Fuente: [11]

### **Octocopters (8 rotores)**

Este dron tiene la capacidad de transportar cargas pesadas a gran velocidad y altura es por eso que se usa bastante en operaciones militares. Además, sus 8 rotores le brindan una estabilidad extrema y gran performance de vuelo como se ilustra en la Figura 2.6. incluso es capaz de continuar en el aire si 2 o 3 motores fallan. Sin embargo, su gran potencia requiere un gran costo de fabricación y por ende de adquisición. [11]



Figura 2.6. Octocopter / Fuente: [11]

## VTOL

En términos generales, los VTOL se distinguen por su capacidad para despegar y aterrizar verticalmente en terrenos irregulares, así como por su habilidad para mantenerse en el aire con respecto a los drones de alas fijas. Además, superan a los multicopters en términos de velocidad, duración de vuelo, capacidad de carga y resistencia al viento. Estas características los convierten en la opción preferida para una variedad de misiones. [12]

Existen varias configuraciones VTOL, a continuación, se presentan algunas de ellas:

### Tilting

Es un dron con despegue y aterrizaje vertical el cual tiene un mecanismo en sus motores que le permite girar 90°, esto con el fin de realizar un avance vertical para su despegue y una vez alcanzada la altura requerida los motores rotan para realizar un avance horizontal, este mecanismo puede estar implementado tanto en 1 como en todos los rotores del dron. Existen varias configuraciones como: tilt-quadplanes, tilt-tricopters, tilt-hexacopters, tilt-wings, entre otros. Destaca por su fácil manejo y estabilidad, sin embargo, el control y programación del mismo es complejo, ya que, la etapa de transición hasta alcanzar el vuelo crucero es inestable y susceptible a sufrir disturbios. [13]

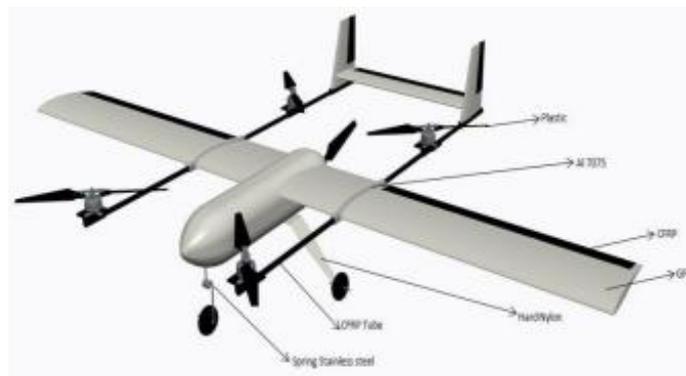


Figura 2.7. VTOL Híbrido / Fuente: [6]

En la Figura 2.7. se observa un UAV VTOL híbrido, analizado por la Escuela de Ingeniería de la Universidad RMIT en Australia, en el cual se menciona algunas desventajas que presenta este modelo en comparación con UAVs normales multirotor o de ala fija, como es el peso considerable del modelo, menor aerodinámica y su restricción de fuselaje. [6]

### **Tail Sitter**

Este VTOL se caracteriza por ubicarse en forma de cohete para su despegue y aterrizaje. Es el más simple en el segmento VTOL ya que en su mayoría solo tienen 2 rotores y un elevador los cuales permite su posición de vuelo horizontal en el aire [14]. Este modelo es fácil de transportar y configurar dado que se compone de una sola pieza, lo que representa un ahorro de tiempo y recursos en el campo, así mismo tiene menos peso y es más económico que otros modelos. Su reto más grande es la dificultad para sincronizar el vuelo en la transición, especialmente en condiciones de viento desfavorables. [13]



Figura 2.7. Tail Sitter / Fuente: [14]

## **1.6 Contribución del trabajo**

- 1) Se va a disminuir el peso del prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan, lo que se traduce en un diseño más liviano en el prototipo mejorado, para conseguirlo se va a usar fibra de vidrio en las partes más vulnerables de los elementos del UAV VTOL, de esta forma con la disminución de peso se logra incrementar el tiempo de vuelo.
- 2) Se diseñará un nuevo mecanismo tilting el cual ocupa menos espacio y es más eficiente, de esta forma se elimina el excedente de peso de este mecanismo, permitiendo llevar más carga útil.
- 3) Para mejorar el ensamblaje y conexiones del UAV VTOL, se diseñará diversas piezas mecánicas las cuales permitirán una mayor rigidez y funcionamiento del dron como en el caso de los flaps.

- 4) Se va a implementar un tercer tilting en la cola, con el fin de mejorar el vuelo crucero y perfeccionar la etapa de transición de los motores tilting.
- 5) De acuerdo a los requerimientos del laboratorio se va a redimensionar algunos elementos como es el sistema de propulsión eléctrica, además se va a reubicar las conexiones eléctricas y electrónicas, lo que aumenta la vida útil de estos dispositivos.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Configuración base del UAV VTOL

La configuración base se obtiene a partir del prototipo diseñado por Quinteros Calispa Mauricio Antonio y Sarango Diaz Juan Carlos. El cual a su vez se desarrolló a partir del modelo "Event" perteneciente al grupo ATA-EPN, a continuación, se muestra las medidas de las partes principales de la estructura del dron:

Tabla 2.1. Dimensiones de las partes principales del modelo Event 386

ELEMENTO	DIMENSIONES [cm]			
	Largo	Ancho	Altura	Diámetro
Fuselaje	60,40	14,80	22,90	-
Ala izquierda/derecha	94,50	22,50	5,79	-
Cola	29,98	3,96	25,41	-
Elevador	54,98	19,02	2,37	-
Tubo de conexión	142	-	-	ext. 0,97
Tubo de cola	64	-	-	ext. 2,15

Fuente: [15]

Para este UAV también se tiene características de vuelo, las cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 2.2. Características de vuelo del modelo Event 386

CARACTERÍSTICA	VALOR
Altitud de operación [m]	3000 - 4000
Velocidad de elevación [m/s]	2 - 5
Velocidad de crucero [m/s]	10 - 15
Velocidad de pérdida (mínima) [m/s]	5
Carga útil aproximada [kg]	1

Fuente: [15]

La masa de cada una de las partes se obtuvo mediante software, sin embargo, estos valores fueron relativos, ya que, cambió las propiedades de los materiales usados, técnicas de fabricación, sub/sobredimensionamiento, entre otras.

Tabla 2.3. Masa del prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan

<b>COMPONENTE</b>	<b>MASA [g]</b>	<b>MASA REAL [g]</b>
Fuselaje + masa aproximada elementos complementarios	447+1003	1304
Ala izquierda + derecha	2 * 312,48	1479
Estabilizador horizontal	70	265
Estabilizador vertical	159,28	
Conector superior	90,72	100
Conector posterior	115,41	-
Total	2510,37	3148

Fuente: [15]

De la tabla 2.3. se puede notar que los valores reales exceden en 25,4% el peso obtenido inicialmente por software, lo que se traduce en mayor potencia requerida en los motores y menor autonomía para el dron.

Este modelo está compuesto por 2 motores tilting (uno en cada ala) y uno fijo (cola), una vez obtenida la masa total del prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan, se calculó el peso total, fuerzas y potencias requeridas en cada condición de vuelo, de donde se obtuvo:

Tabla 2.4. Peso, fuerzas y potencias del prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
Peso total del UAV [N]	52,29
Fuerza empuje con FS=2 [N]	104,58
Potencia despegue [W]	1302,34
Fuerza de arrastre [N]	0,9322
Potencia de arrastre [W]	79,091

Fuente: [15]

El motor y propela escogidos para satisfacer la potencia calculada fueron los siguientes:

Tabla 2.5. Motor y propela para el prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan

COMPONENTE	ESPECIFICACIÓN	VALOR
Motor	Potencia [W]	1750
	Masa [g]	207
Propela	Paso [in]	8
	Diámetro hélice [in]	12
	Diámetro del eje [in]	0,25
	Masa [oz]	1,69

Fuente: [15]

Una vez ensamblado el prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan se efectuaron pruebas de vuelo en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional para posteriormente realizar misiones en el Antisana y verificar que el dron puede funcionar en condiciones exigentes.

De este test se sacaron las siguientes observaciones:

- 1) El peso de las alas y fuselaje supera el valor obtenido por simulación, esto debido a la utilización de una fibra híbrida de carbono con kevlar en las alas y fibra de carbono en el fuselaje como se muestra en la Figura 2.1. estas fibras junto con la resina se aplicaron en la totalidad de ambos elementos lo que aportó demasiado peso. Con ello la potencia requerida en los motores para elevar el dron aumenta afectando al performance de vuelo y el porcentaje de activación de los motores.

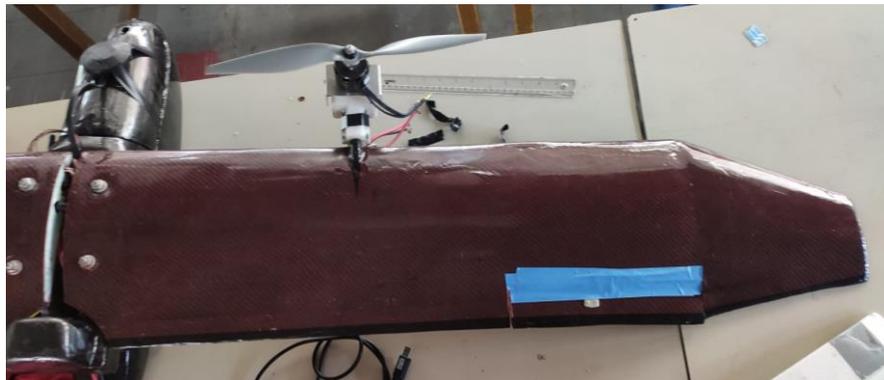


Figura 2.1. Recubrimiento híbrido de carbono con kevlar prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan / Fuente: propia

- 2) Como se observa en la Figura 2.2. el mecanismo tilting ocupa un espacio considerable lo que aporta demasiado peso a la estructura, por otra parte, el sistema empleado para la rotación del mecanismo no es el más exacto, ya que al rotar el elemento el torque generado en ambos lados de la platina de acero no se transmite de forma correcta.



Figura 2.2. Mecanismo Tilting del prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan /  
Fuente: propia

## 2.2 Rediseño de la estructura del UAV VTOL

El rediseño constituye la parte más importante del proyecto, pues aquí se perfecciona el modelo tomando en cuenta las fortalezas y debilidades del prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan; y las nuevas implementaciones. Se divide en 4 etapas: selección del material estructural, fabricación de los elementos del UAV VTOL, recubrimiento y acabado superficial.

### Selección del material estructural

En el laboratorio LUAS (Laboratorio de Sistemas Aéreos No Tripulados) del grupo de investigación ATA-EPN, está disponible 2 materiales para la estructura interna de los elementos que componen el UAV VTOL, EPS (poliestireno expandido) el cual tiene un acabado no uniforme y XPS (poliestireno extruido) con acabado liso. En la Figura 2.3. se observa ambos materiales EPS y XPS respectivamente, para el prototipo mejorado se ha optado por la utilización de XPS principalmente porque es más rígido y resistente, además por su composición tiene mayor resistencia al calor lo que permite cortar con mayor facilidad sin dañar el material y después realizar un proceso de lijado o pulido. [16]

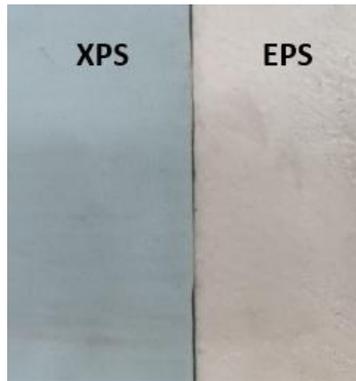


Figura 2.3. XPS (poliestireno extruido) y EPS (poliestireno expandido) / Fuente: propia

### **Fabricación de los elementos del UAV VTOL**

Los elementos del UAV VTOL que se van a fabricar son 4: alas, fuselaje, cola y elevador.

#### **Corte del material estructural**

Para empezar la fabricación de las partes del UAV VTOL se corta bloques de XPS de acuerdo a las dimensiones de cada uno, para ello se usa 2 máquinas cortadoras de espuma caseras las cuales han sido construidas por estudiantes de la Escuela Politécnica Nacional como se observa en la Figura 2.4. el principio de funcionamiento del artefacto consiste en elevar la temperatura de un hilo de nicrom aplicando voltaje a los extremos del mismo, el hilo se coloca en una estructura que permite mantenerlo horizontal o vertical.



Figura 2.4. Máquinas cortadoras de XPS

#### **Mecanizado de agujeros**

Una vez que se ha adquirido el bloque de material, se procede a la creación de agujeros. Es crucial llevar a cabo este paso antes de cortar los perfiles, ya que realizar este proceso posteriormente conlleva cierta delicadeza. Existe el riesgo de que el material se desprenda en pedazos y comprometa la integridad de la forma de la pieza. Como se muestra en la

Figura 2.5. este proceso se ha realizado con fresadora para obtener una perforación exacta.

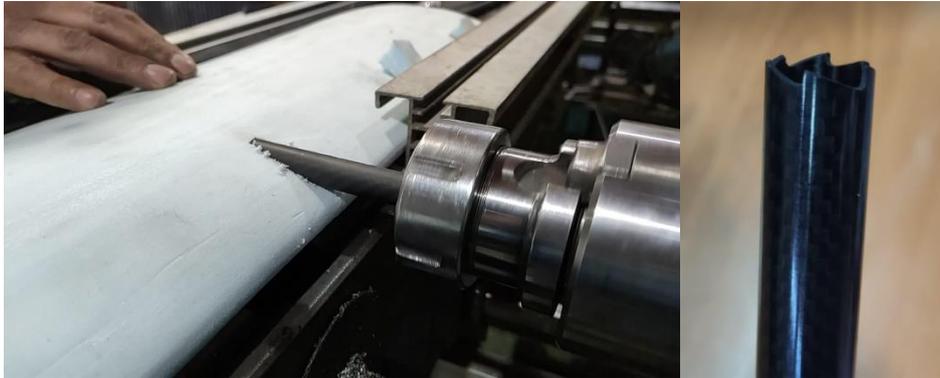


Figura 2.5. Fresado de XPS / Fuente: propia

Además, se ha usado el tubo de fibra de carbono como herramienta para perforar, dado que la fresa al ser muy dura desprendía el material en pedazos grandes.

### **Obtención de los perfiles**

Con ayuda de un software CAD se obtiene perfiles de las secciones transversales uniformes de los elementos, los mismos que se cortan con láser en acrílico esto debido a que no se quema como es el caso de la balsa o MDF.

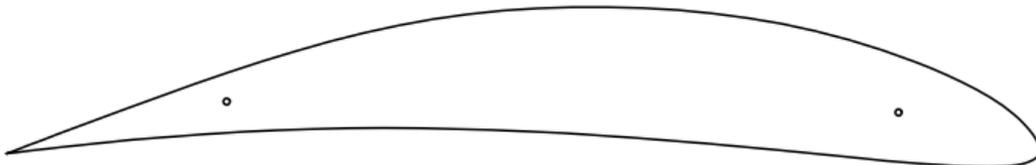


Figura 2.6. Perfil sección transversal ala / Fuente: propia

En la Figura 2.6. se observa el perfil usado para la sección transversal del ala, el mismo que se obtiene realizando un corte en el modelo CAD con ayuda del software. Posterior se añade 2 agujeros los cuales sirven para sujetar el perfil al bloque de XPS.

### **Perfilado**

Como se observa en la Figura 2.7. los perfiles de acrílico deben colocarse centrados en las caras opuestas de la espuma, este proceso debe ser realizado por al menos 2 personas, ya que, cada una debe verificar que el hilo de nicrom este cortando correctamente la espuma siguiendo el perfil. Para ello se debe tener en cuenta lo siguiente:



Figura 2.7. Perfil de acrílico centrado en el bloque cortado de XPS / Fuente: propia

- 1) Se debe configurar el amperaje y voltaje que se va aplicar al hilo, si la espuma pasa con dificultad se debe aumentar el voltaje, en cambio si el hilo se deforma y humea se debe disminuir. En la Figura 2.8. se puede observar un DC Power Supply el cual sirve para controlar el amperaje y voltaje que se aplica al hilo de nicrom por medio de 2 lagartos eléctricos.



Figura 2.8. DC Power Supply / Fuente: propia

- 2) El hilo de nicrom debe asentarse bien en el perfil y pasar por la parte inferior como se observa en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Posición del hilo de nicrom para corte / Fuente: propia

- 3) El avance debe ser lento, dado que si se aplica mucha presión el hilo se romperá.

- 4) Si la sección es pequeña como en la Figura 2.10. se debe cortar la sección amplificada, caso contrario la pieza se deforma como es el caso de la Figura 2.11.



Figura 2.10. Amplificación de sección en corte / Fuente: propia



Figura 2.11. Deformación por mal corte / Fuente: propia

### **Lijado**

Una vez logrado el corte se debe lijar el elemento hasta obtener una superficie uniforme y transición suave, para ello se usa una lija de grano fino y por último lija de agua. Después se debe limpiar la superficie y verificar que el elemento no tenga desprendimientos de material para que el recubrimiento de fibra pueda adherirse correctamente.



Figura 2.12 Lijado de componentes en XPS / Fuente: propia

La Figura 2.12. muestra la parte superior de la cola, que presentaba inicialmente una superficie rugosa con desprendimientos de material. Después de llevar a cabo el proceso de lijado, se logró obtener un acabado superficial suave. Es esencial considerar un sobredimensionamiento en la etapa de corte, con el fin de preservar las dimensiones deseadas durante el proceso de lijado.

### **Unión de secciones**

Con el método usado en este proyecto no se puede obtener los elementos de un solo corte, a menos que la sección sea uniforme en su totalidad, por eso se debe unir las partes de cada componente hasta obtener la pieza final. Para unir las secciones se coloca palos de balsa incrustados en las caras de ambas partes con el fin de aportar rigidez, luego se aplica

resina Epoxi para sellar la unión y se espera al menos 36 horas para que la resina seque completamente.



Figura 2.13. Unión de secciones / Fuente: propia

La Figura 2.13. muestra 2 vistas de la unión de las 2 secciones presentes en el ala, en la primera se puede notar el sellado completo de ambas partes, mientras que en la segunda se aprecia la inclinación de la punta del ala.

### **Recubrimiento**

Para disminuir el exceso de peso, se optó por aplicar fibra de vidrio en el prototipo mejorado, debido a su naturaleza más ligera, así como a sus mejores prestaciones en términos de solidez y elasticidad en comparación con la fibra de carbono y la fibra híbrida compuesta por carbono y kevlar como se ve en la Figura 2.14.



Figura 2.14. Comparación fibras / Fuente: propia

La distribución de la fibra de vidrio es localizada, lo que significa que se aplicó específicamente en las áreas más vulnerables de los componentes del dron. Un ejemplo de ello es su colocación en los extremos de los perfiles de las alas, donde se utilizaron pedazos de fibra de vidrio de 4 y 5 cm de espesor. También se aplicó en la parte central, que es la zona por donde pasa el tubo de fibra de carbono encargado de brindar soporte a las alas y sujetarlas al fuselaje como se observa en la Figura 2.15. De esta manera, se

buscó reforzar y fortalecer estas zonas vulnerables del dron para mejorar su rendimiento y durabilidad.



Figura 2.15. Recubrimiento localizado ala / Fuente: propia

En las partes donde se coloca pernos y tornillos también se aplica recubrimiento para rigidizar el área y evitar desprendimientos de material dañando el elemento.

### **Corte y unión flaps**

Una vez realizado el recubrimiento se procede con la obtención de los flaps, los cuales pertenecen a las alas, cola y elevador. Para ello con la ayuda de un estilete o caladora se corta de acuerdo a las dimensiones requeridas como se muestra en la Figura 2.16.



Figura 2.16. Corte flap / Fuente: propia

Para unir los flaps a los diferentes componentes se ha diseñado un elemento mecánico que cumple con la función de bisagra como se ve en la Figura 2.17.

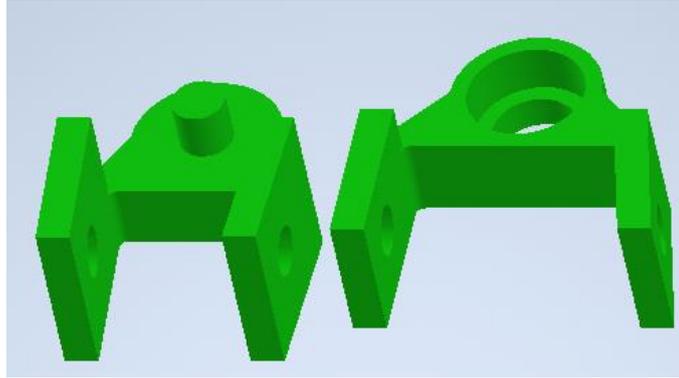


Figura 2.17. Bisagra / Fuente: propia

Este componente consta de dos partes (macho y hembra) que encierran un rodamiento en su interior, permitiendo una transmisión de movimiento precisa y continua. El macho está equipado con un eje que se inserta a presión en medio del rodamiento, y ambos elementos se ensamblan de manera ajustada en la hembra.

### **Acabado superficial**

Para lograr el acabado superficial deseado, se procedió a lijar la superficie nuevamente, aplicando mayor fuerza debido a la mayor dificultad para remover el recubrimiento. Además, se utilizó un estilete para eliminar las áreas con exceso de recubrimiento y darle un aspecto más uniforme. En la figura 2.18 se observa los flaps del elevador los cuales fueron recubiertos en su totalidad, después del lijado este quedó completamente liso.



Figura 2.18 Acabado superficial elevador / Fuente: propia

## 2.3 Matriz de selección de mecanismos

La metodología usada para la elección de mecanismos fue por medio de una matriz de selección, para ello, primero se identifica las piezas mecánicas necesarias para la construcción del UAV VTOL:

- Unión de tubos de fibra de carbono
- Unión cola - fuselaje
- Soporte de alas
- Unión de flaps
- Caja portadora del servomotor
- Mecanismo de transmisión de torque
- Soporte de motor

Luego, se realiza una tabla con las alternativas y requerimientos necesarios en cada una de las partes del mecanismo tilting, después se asigna un valor numérico en la escala del 1 al 5 (donde 1 es bajo y 5 alto) dependiendo del cumplimiento de cada parámetro en cada alternativa. Posterior a esto se designa una ponderación a cada parámetro según su importancia en el diseño, este valor tiene una escala del 1 al 5 de igual forma. Finalmente, se multiplica el valor asignado al cumplimiento del parámetro con la ponderación del mismo, y la alternativa que tenga el mayor resultado al sumar todos los valores será la escogida.

Tabla 2.6. Matriz de selección de unión de tubos de fibra de carbono

Alternativa	Calidad de fabricación P: 4	Facilidad de fabricación P: 3	Resistencia P: 5	Peso P: 5	Total
<b>Codo de PLA</b>	4	5	3	4	66
	$4 \times 4 = 16$	$3 \times 5 = 15$	$5 \times 3 = 15$	$5 \times 4 = 20$	
<b>Codo de fibra de carbono</b>	3	3	4	4	61
	$4 \times 3 = 12$	$3 \times 3 = 9$	$5 \times 4 = 20$	$5 \times 4 = 20$	

En la Tabla 2.6. la alternativa escogida para unir tubos de fibra de carbono fue codo PLA principalmente por la calidad y facilidad de fabricación.

Tabla 2.7. Matriz de selección de unión cola - fuselaje

Alternativa	Rigidez P: 5	Resistencia al desgaste P: 4	Peso P: 3	Total
Perno	3	4	4	43
	$5 \times 3 = 15$	$4 \times 4 = 16$	$3 \times 4 = 12$	
Taco Fischer PLA	5	4	4	53
	$5 \times 5 = 25$	$4 \times 4 = 16$	$3 \times 4 = 12$	

En la Tabla 2.7. el taco Fischer PLA fue seleccionado para unir la cola con el fuselaje, principalmente por la rigidez de ensamblaje que presenta el mismo, esto permite tener un enganche preciso, bloqueando el movimiento y rotación de la cola respecto al fuselaje.

Tabla 2.8. Matriz de selección de soporte de alas

Alternativa	Facilidad de ensamblaje P: 4	Resistencia a la deflexión P: 5	Resistencia al desgaste P: 4	Peso P: 5	Total
Ángulo acero	5	3	5	4	75
	$4 \times 5 = 20$	$5 \times 3 = 15$	$4 \times 5 = 20$	$5 \times 4 = 20$	
Soporte alas PLA	4	5	4	4	77
	$4 \times 4 = 16$	$5 \times 5 = 25$	$4 \times 4 = 16$	$5 \times 4 = 20$	
Perno	4	4	3	5	73
	$4 \times 4 = 16$	$5 \times 4 = 20$	$4 \times 3 = 12$	$5 \times 5 = 25$	

En la Tabla 2.8. el soporte de alas PLA fue la alternativa escogida con la mínima diferencia de 2 puntos, dado que envuelve todo el fuselaje tiene resistencia a la deflexión permitiendo un ensamblaje sólido, por otra parte, el ángulo de acero tiende a deflejar y al igual que el perno desgastan el material hasta desprender parte del mismo.

Tabla 2.9. Matriz de selección de unión flaps

Alternativa	Anclaje P: 5	Facilidad de rotación P: 5	Resistencia al desgaste P: 5	Peso P: 5	Total
Cinta	4	4	3	5	80
	$5 \times 4 = 20$	$5 \times 4 = 20$	$5 \times 3 = 15$	$5 \times 5 = 25$	
Bisagra con pasador	5	5	5	3	90
	$5 \times 5 = 25$	$5 \times 5 = 25$	$5 \times 5 = 25$	$5 \times 3 = 15$	
Bisagra con rodamiento	5	5	5	4	95
	$5 \times 5 = 25$	$5 \times 5 = 25$	$5 \times 5 = 25$	$5 \times 4 = 20$	

En la Tabla 2.9. la bisagra con rodamiento fue la alternativa más viable, principalmente destacó frente a la bisagra con pasador por su menor peso.

Tabla 2.10. Matriz de selección de la caja portadora del servomotor

Alternativa	Calidad de fabricación P: 4	Facilidad de fabricación P: 3	Resistencia P: 5	Peso P: 5	Total
Caja de PLA	4	5	4	4	71
	$4 \times 4 = 16$	$3 \times 5 = 15$	$5 \times 4 = 20$	$5 \times 4 = 20$	
Caja de acrílico	3	4	3	3	54
	$4 \times 3 = 12$	$3 \times 4 = 12$	$5 \times 3 = 15$	$5 \times 3 = 15$	
Caja de acero 1 [mm]	4	3	5	3	65
	$4 \times 4 = 16$	$3 \times 3 = 9$	$5 \times 5 = 25$	$5 \times 3 = 15$	

En la Tabla 2.10. el material escogido para realizar la caja portadora del servomotor es PLA con un puntaje de 71 puntos, seguido de acero 1 [mm] con 65 puntos y finalmente acrílico con 54 puntos. La caja de PLA se obtiene por medio de impresión 3D.

Tabla 2.11. Matriz de selección del mecanismo de transmisión de torque

Alternativa	Precisión P: 5	Facilidad de ensamblaje P: 4	Capacidad de carga P: 5	Peso P: 5	Total
Extensión del eje del servomotor + 2 brazos de servomotor	3	3	4	4	67
	$5 \times 3 = 15$	$4 \times 3 = 12$	$5 \times 4 = 20$	$5 \times 4 = 20$	
Bocín + 1 brazo servomotor + 2 ejes de aluminio	4	4	3	4	71
	$5 \times 4 = 20$	$4 \times 4 = 16$	$5 \times 3 = 15$	$5 \times 4 = 20$	

En la Tabla 2.11. el sistema bocín – brazo – eje superó en precisión y facilidad de ensamblaje a la extensión de motor – brazo.

Tabla 2.12. Matriz de selección del soporte del motor

Alternativa	Facilidad de rotación P: 4	Resistencia al desgaste P: 4	Capacidad de carga P: 5	Peso P: 3	Total
Soporte de motor de PLA	3	2	4	5	55
	$4 \times 3 = 12$	$4 \times 2 = 8$	$5 \times 4 = 20$	$3 \times 5 = 15$	
Soporte de motor de Acero	5	4	5	4	73
	$4 \times 5 = 20$	$4 \times 4 = 16$	$5 \times 5 = 25$	$3 \times 4 = 12$	
Soporte de motor de acrílico	3	2	3	3	44
	$4 \times 3 = 12$	$4 \times 2 = 8$	$5 \times 3 = 15$	$3 \times 3 = 9$	

En la Tabla 2.12. por mucha diferencia el soporte de motor de acero fue elegido, el aspecto más importante en este punto es la capacidad de carga y facilidad de rotación, ya que esta pieza es la primera en recibir la fuerza de empuje que generan los motores.

## 2.4 Rediseño del mecanismo tilting para el UAV VTOL

De acuerdo con las necesidades el laboratorio de LUAS (Laboratorio de Sistemas Aéreos No Tripulados) del grupo de investigación ATA-EPN de la Escuela Politécnica Nacional, se decidió hacer un modelo con 3 tilting, es decir, se va añadir un tilting en la cola en comparación con el prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan. Para abordar esta parte se consideró lo siguiente:

### Caja portadora del servomotor

Con el diseño de la nueva caja portadora del servomotor se redujo en gran medida peso y el espacio que ocupa el mismo, se optó por crear la caja a la medida del servomotor como se observa en la Figura 2.19. tomando en cuenta lo siguiente:

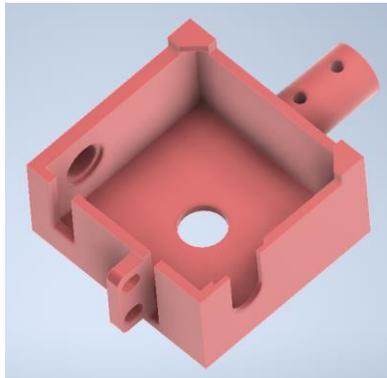


Figura 2.19. Caja portadora de servomotor / Fuente: propia

- 1) El servomotor debe entrar en apriete para evitar que este se salga.
- 2) Se colocó 2 topes superiores por seguridad.
- 3) Se colocó una ranura en la cual se puede atornillar el servomotor a la caja.
- 4) Contiene 2 agujeros los cuales sirven para colocar la placa que va a soportar al motor, por un lado, se atornilla al eje del servomotor y por otro a un eje diseñado para permitir la rotación y soporte de la misma.
- 5) En la parte trasera tiene un acople el cual entra en el tubo de fibra de carbono que se usa para sostener la caja, además tiene 2 agujeros por donde pasa el prisionero de esta forma se bloquea el movimiento en los ejes y la rotación de la caja, manteniéndola fija.
- 6) En la parte inferior existe un agujero cuyo único funcionamiento es para retirar el servomotor en caso de que se necesite sacarlo.

## Mecanismo de rotación

En la Figura 2.20. se observa el mecanismo de rotación el cual se compone de 3 piezas: la placa porta motor y 2 ejes que le aportan rigidez.

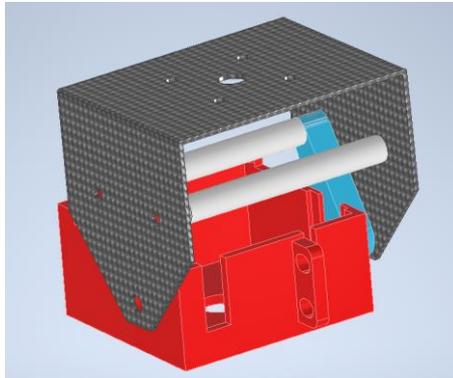


Figura 2.20. mecanismo de rotación / Fuente: propia

Las características que aportan estas piezas mecánicas al mecanismo son:

- 1) En los laterales hay 3 agujeros: el inferior sirve para unir la placa a la caja del servomotor con tornillo, por medio de un brazo (color turquesa) el cual viene de fábrica con el motor.
- 2) Los agujeros laterales superiores sirven para atornillar los ejes, los cuales sirven para transmitir la rotación y brindar rigidez al mecanismo cuando rota, de esta manera la transmisión del torque en ambos lados de la placa es rápida y precisa.
- 3) El agujero central superior permite el paso del eje del motor.
- 4) Los 4 agujeros superiores restantes permiten la sujeción del motor a la placa por medio de tornillos.
- 5) El material escogido para la placa es acero de 1 [mm] de espesor, ya que se necesita de un material lo bastante sólido y resistente para aguantar el peso del motor y la rotación del mecanismo sin deformarse como sería el caso del aluminio o impresión 3D, por último, la placa fue doblada en ángulo de 90°.

## Reubicación tilting alas

En el prototipo de Quinteros Mauricio y Sarango Juan, el mecanismo tilting de las alas quedó muy expuesto por lo que el tubo de fibra de carbono tendía a deflejar. Por esta razón se decidió integrar parte del mecanismo dentro del ala tal como se muestra en la Figura 2.21. De esta manera el peso se distribuye en el ala y el tubo de fibra de carbono.

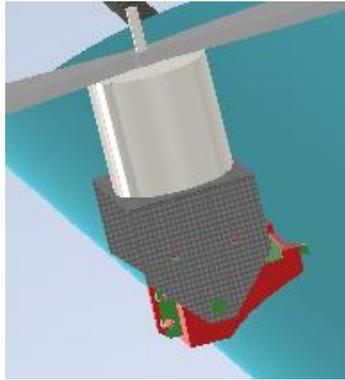


Figura 2.21. Tilting integrado en las alas / Fuente: propia

El tubo de fibra de carbono que brinda apoyo estructural al ala y la que sostiene el mecanismo tilting se cruzan generando un sellado preciso como se ilustra en la Figura 2.22.

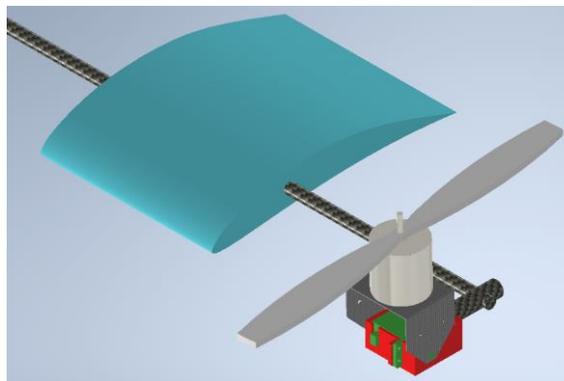


Figura 2.22. Unión tubos fibra de carbono / Fuente: propia

### **Diseño de estructura y ubicación de tilting para la cola**

Para incorporar el tercer tilting, nos basamos en el diseño del modelo "Quantum" [17] el cual tiene el tercer motor en la parte superior de la cola. Para determinar su ubicación en el presente proyecto, se tomó en cuenta la posición de la propela Figura 2.23. ya que es crucial evitar cualquier posible colisión con la estructura de la cola.

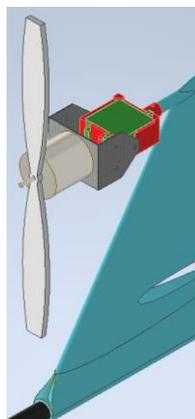


Figura 2.23. Ubicación tilting cola / Fuente: propia

Agregando a lo anterior, para brindar soporte al tintilg se diseñó una estructura como se muestra en la Figura 2.24.



Figura 2.24. Estructura cola / Fuente: propia

La cual se compone de 4 tubos de fibra de carbono y 2 codos diseñados en software CAD e impresos en 3D. La estructura se diseñó conservando el ángulo de inclinación de la cola y tomando en cuenta que debe ser interna al XPS, el cual brinda soporte a la estructura para que esta no se deforme como se observa en la Figura 2.25.

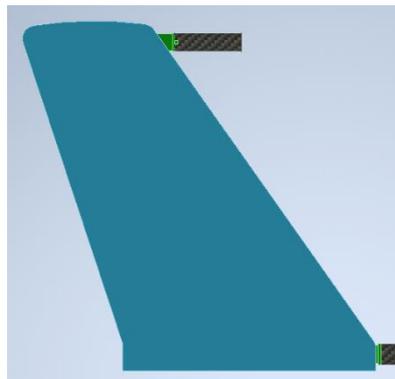


Figura 2.25. Estructura de la cola interna al XPS/ Fuente: propia

### Reubicación del elevador

De igual forma el elevador conserva el diseño planteado en el modelo “Quantum” [17] el cual tiene el elevador en la extensión de la cola. Para el prototipo mejorado se decidió integrar el tubo de fibra de carbono que sostiene la cola por medio del elevador tal cual la Figura 2.26. Para unir estos componentes se aplicó resina epoxi para mantener fijas las partes y evitar que roten o desplacen perjudicando el performance de vuelo.

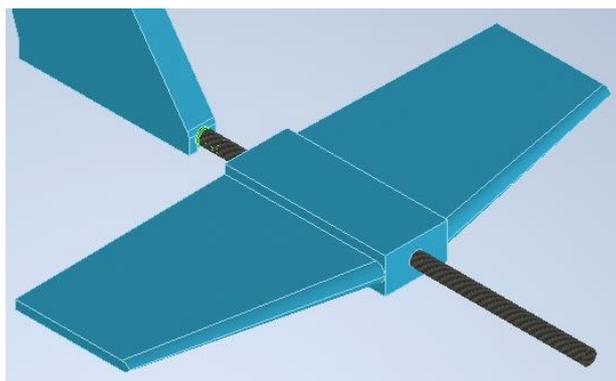


Figura 2.26. Estructura cola / Fuente: propia

## 2.5 Rediseño del sistema de propulsión

### Banco de pruebas con motores y propelas

Para realizar la prueba de motores y propelas se usó un “BANCO DE PRUEBAS PARA EL SISTEMA DE PROPULSIÓN DE UN UAV DE ALA FIJA” diseñado por Juan Diego Hernández Yáñez y Johanna Elizabeth Nandar Carvajal, el cual se encuentra en el laboratorio de LUAS (Laboratorio de Sistemas Aéreos No Tripulados) del grupo de investigación ATA-EPN de la Escuela Politécnica Nacional.

En la Figura 2.27 se observa el banco de pruebas, este se compone en hardware de motor, ESC, batería y Hélice los cuales tiene valores máximos de operación como se muestra en la TABLA 2.6. Además, tiene componentes electrónicos que son: módulo de potencia para medir voltaje, módulo de potencia para medir amperaje, sensor óptico de velocidad, celda de carga de empuje, módulo de empuje; y anemómetro. Todos estos componentes reciben y procesan la información y arrojan las mediciones por medio de la interfaz. Su funcionamiento empieza al insertar el porcentaje de aceleración inicial, entonces los componentes comienzan a tomar datos, la hélice rota generando el movimiento de la estructura que la sostiene, esta a su vez empuja un sensor el cual toma el dato de los gramos que empuja la propela junto con el motor. [18]

Tabla 2.13. Valores máximos de operación del banco de pruebas

Variable	Voltaje	Corriente	Velocidad	Empuje	Tamaño del motor
Valor máximo	30V	50A	16000 RPM	5000g	25mm

Fuente: [18]



Figura 2.27. Banco de pruebas / Fuente: [18]

En la Figura 2.28. se muestra un ejemplo de las mediciones obtenidas en el banco de pruebas los mismos que se observan mediante la interfaz de la máquina.

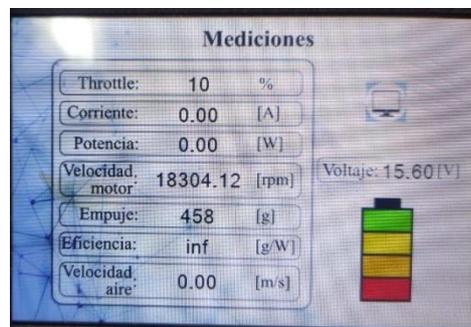


Figura 2.28. Interfaz banco de pruebas / Fuente: propia

Como se muestra en las tablas los datos arrojados por la máquina son: porcentaje de aceleración, corriente, potencia, empuje, eficiencia de la propela, velocidad y voltaje. Para obtener la eficiencia del motor se aplica la siguiente fórmula.

$$P_e = V * A \quad (1) [19]$$

Donde:

$P_e$  = potencia eléctrica [W]

$V$  = voltaje [V]

$A$  = corriente [A]

$$E_m = \frac{P}{P_e} \quad (2) [19]$$

Donde:

$E_m$  = potencia eléctrica [%]

$P$  = potencia mecánica [W]

$P_e$  = potencia eléctrica [W]

Para esta parte se realizó varias configuraciones con los motores y propelas disponibles en el laboratorio de LUAS (Laboratorio de Sistemas Aéreos No Tripulados) del grupo de investigación ATA-EPN de la Escuela Politécnica Nacional. A continuación, se muestra un ejemplo de la toma de datos obtenida para el motor T-Motor at3520 kv720, los demás datos se muestran en el ANEXO I.

### **T-Motor at3520 kv720**

El motor T-Motor at3520 kv720 se configuró con 3 propelas diferentes, y se realizó al igual que en todos los casos 3 pruebas con la misma configuración:

- Propela 13 x 6,5 E

Tabla 2.14. Prueba 1 / T-Motor at3520 kv720 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.18	18.36	386.00	21.02	97.25%	2526.00
<b>30%</b>	1.81	28.25	973.00	34.44	97.55%	4715.00
<b>50%</b>	1.90	29.19	1600.00	54.81	96.02%	5945.00
<b>70%</b>	2.02	30.69	2009.00	65.46	94.96%	6825.00
<b>90%</b>	2.17	32.08	2741.00	85.44	92.40%	8144.00

Fuente: propia

Tabla 2.15. Prueba 2 / T-Motor at3520 kv720 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.18	18.40	383.00	20.82	97.46%	2540.00
<b>30%</b>	1.81	27.92	1052.00	37.68	96.41%	4673.00
<b>50%</b>	1.90	29.10	1655.00	56.87	95.72%	5909.00
<b>70%</b>	2.02	30.46	2071.00	67.99	94.25%	6788.00
<b>90%</b>	2.16	31.72	2730.00	86.07	91.78%	8104.00

Fuente: propia

Tabla 2.16. Prueba 3 / T-Motor at3520 kv720 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	3	3	3	3	3	3
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.18	18.24	389.00	21.33	96.61%	2531.00
30%	1.81	27.88	1071.00	38.41	96.27%	4696.00
50%	1.90	28.88	1656.00	57.34	95.00%	5912.00
70%	2.02	30.30	2072.00	68.38	93.75%	6760.00
90%	2.22	32.39	2744.00	84.72	91.19%	8075.00

Fuente: propia

Tabla 2.17. Promedio / T-Motor at3520 kv720 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.18	18.33	386.00	21.06	97.10%	2532.33
30%	1.81	28.02	1032.00	36.85	96.74%	4694.67
50%	1.90	29.06	1637.00	56.34	95.58%	5922.00
70%	2.02	30.48	2050.67	67.28	94.32%	6791.00
90%	2.18	32.06	2738.33	85.41	91.79%	8107.67

Fuente: propia

Al final se obtiene un promedio de las 3 mediciones, esto con el fin de trabajar con un valor medio de datos obtenidos para una misma condición, así se reduce el porcentaje de error.

## 2.6 Ensamblaje del UAV VTOL

Contempla la parte final del proyecto, aquí se debe tener precisión y orden en el montaje de cada una de las partes mecánicas y eléctricas.

### Unión cola y fuselaje

Esta unión es permanente, es decir, una vez ensamblados no se podrá separarlos de nuevo, para ello se ha diseñado un elemento mecánico el cual cumple con la función de impedir el movimiento lineal o rotatorio de la cola con respecto al fuselaje, además que la unión se sella con resina epoxi. Este elemento mecánico se basó en el funcionamiento de un taco Fischer como se observa en la Figura 2.29.

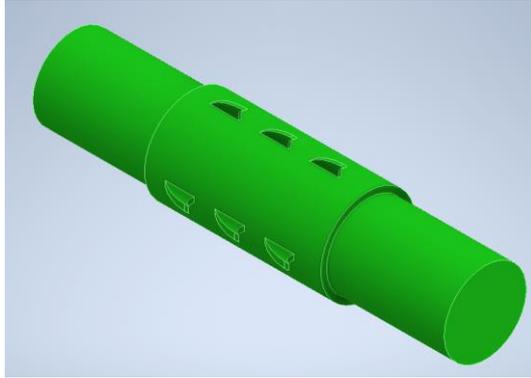


Figura 2.29. Taco Fischer para unir cola y fuselaje / Fuente: propia

De tal forma que entra a presión en el agujero previamente realizado en el fuselaje y queda impregnado de forma permanente. En este paso se debe verificar la alineación de ambas partes tal cual la Figura 2.30.

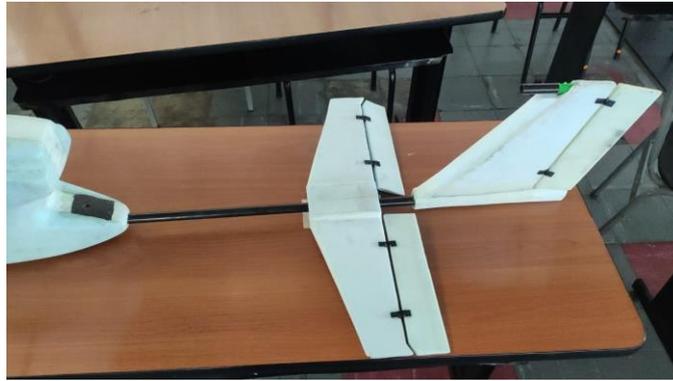


Figura 2.30. unión cola y fuselaje / Fuente: propia

### **Implementación de dispositivos electrónicos**

Los dispositivos electrónicos son los encargados de poner en funcionamiento al dron, para ello se va a tomar como guía el diagrama de cableado del piloto automático del ecosistema CubePilot [20], según las prestaciones requeridas en el UAV VTOL. A continuación, se muestra los elementos principales usados en la configuración del dron:

- 3 motores
- 3 servomotores y 5 mini servomotores
- Sistema de telemetría
- 3 controladores electrónicos de velocidad (ESC)
- Controlador pixhawk 2.1 y radio receptor
- Batería

- Buzzer y USB
- GPS
- Módulos reductores de voltaje
- Tarjeta de distribución de energía
- Módulo de alimentación

Todos estos componentes suman un peso aproximado de 2,5 [kg].

### Unión fuselaje y alas

Una vez instalados todos los dispositivos en el fuselaje, se coloca el soporte de las alas el cual fue diseñado en software CAD e impreso en 3D y se muestra en la Figura 2.32.

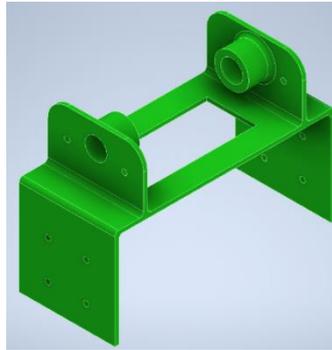


Figura 2.32. Soporte alas / Fuente: propia

Básicamente este se apoya en el fuselaje y se atornilla por medio de 4 agujeros ubicados en los laterales, mientras que las alas se asientan en la grada generada en el exterior de la parte superior del soporte. El tubo de fibra de carbono que sostiene a las alas pasa por medio de los agujeros centrales superiores y de igual forma se atornilla a los perfiles de acrílico pagados con resina epoxi en la sección transversal del ala, teniendo como resultado un ensamblaje exacto y rígido expuesto en la Figura 2.33.



Figura 2.33. Unión fuselaje y alas / Fuente: propia

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Dimensiones y masas finales

Tabla 3.1. Dimensiones de las partes principales del prototipo mejorado

ELEMENTO	DIMENSIONES [cm]				Unidades	MASA total [g]
	Largo	Ancho	Altura	Diámetro		
Fuselaje + tapa	57	12	20,5	-	1	264
Soporte alas	115	50	84	-	1	
Ala izquierda/derecha	94,5	23	3	-	2	380
Tubo de conexión alas	99	-	-	ext. 11,5 int. 10	1	81
Cola	26,5	3,5	29	-	1	213
Elevador	54	18	4	-	1	
Tubo de conexión cola	85	-	-	ext. 15,75 int. 14	1	
Mecanismo tilting	57	45	52	-	3	177
Caja servomotor tilting	64	47	25	-	3	
<b>Total</b>	-	-	-	-	-	1115

Fuente: propia

De las dimensiones y masas finales se obtiene lo siguiente:

- Las dimensiones de los componentes se conservan en cuanto al prototipo anterior.
- Existe una reubicación del elevador, por tal motivo la forma de este al igual que la cola cambian.
- La masa final obtenida reduce en 282% el prototipo anterior, ya que este pesaba aproximadamente 3148 [g] mientras que el prototipo mejorado 1115 [g].

## 3.2 Gráficas de motores y propelas

- T-Motor at3520 kv850

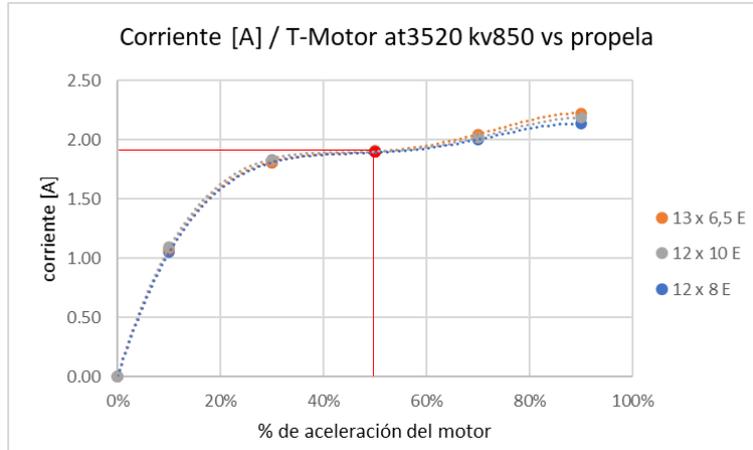


Figura 3.2. Corriente [A] vs % de aceleración / Fuente: Propia

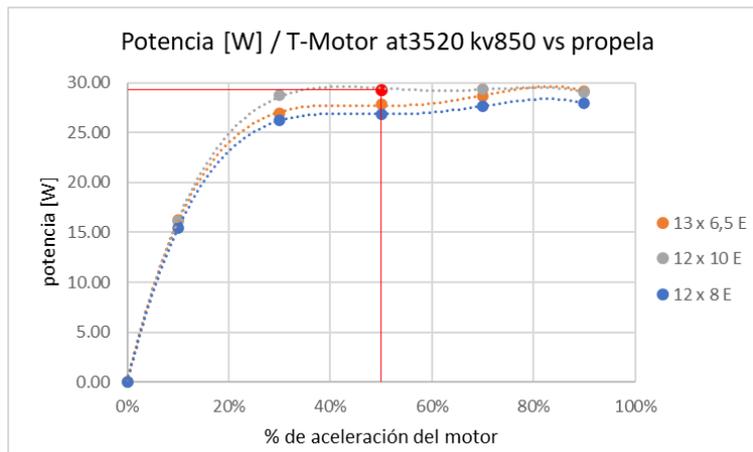


Figura 3.3. Potencia [W] vs % de aceleración / Fuente: Propia

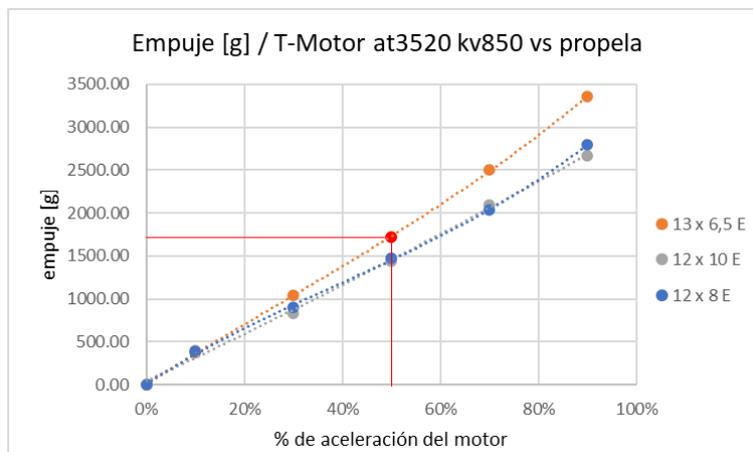


Figura 3.4. Empuje [g] vs % de aceleración / Fuente: Propia

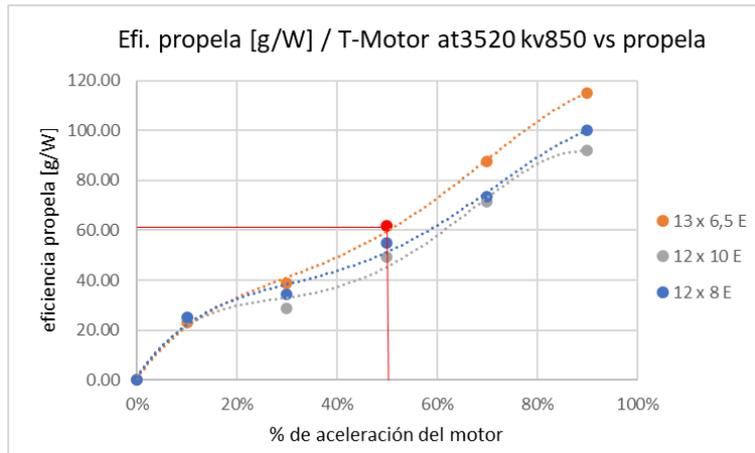


Figura 3.5. Eficiencia propela [g/W] vs % de aceleración / Fuente: Propia

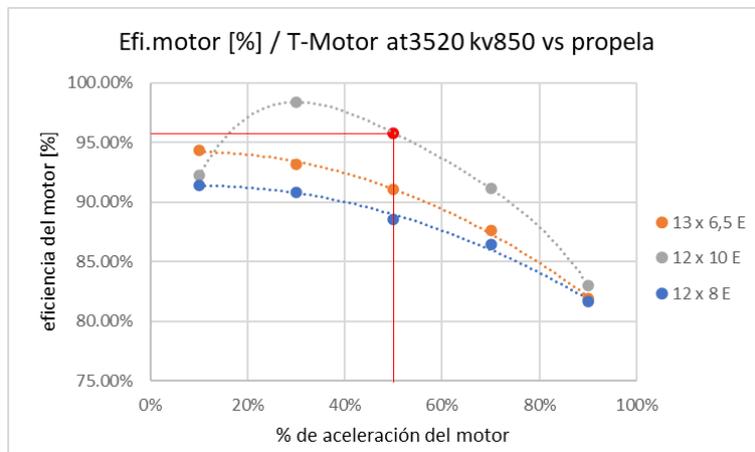


Figura 3.6. Eficiencia del motor [%] vs % de aceleración / Fuente: Propia

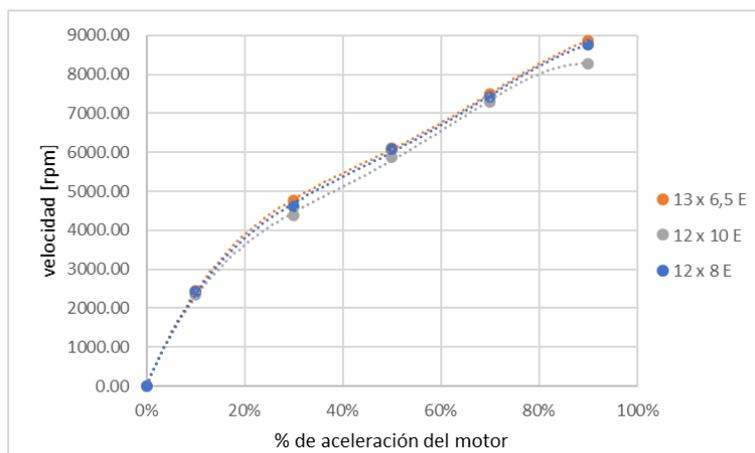


Figura 3.7. Velocidad [rpm] vs % de aceleración / Fuente: Propia

- T-motor am480 kv650

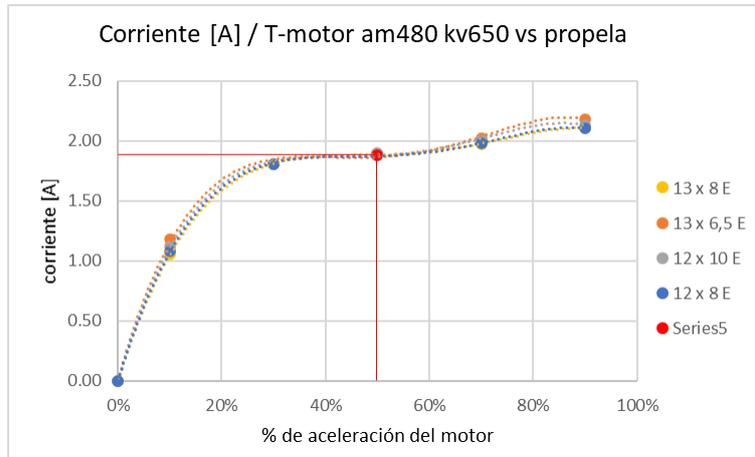


Figura 3.8. Corriente [A] vs % de aceleración / Fuente: Propia

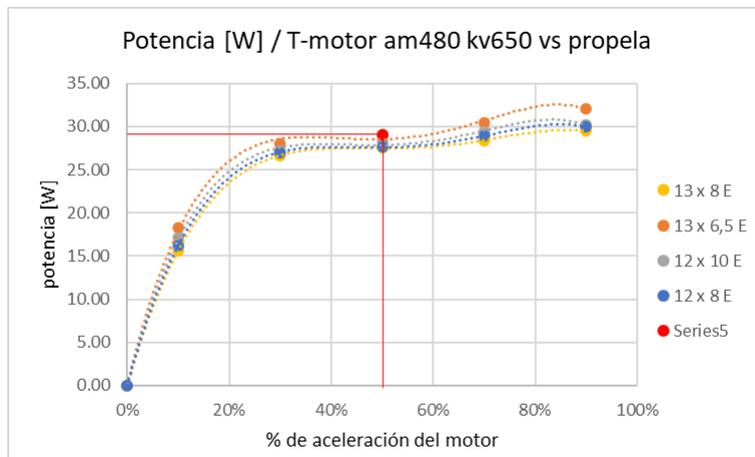


Figura 3.9. Potencia [W] vs % de aceleración / Fuente: Propia

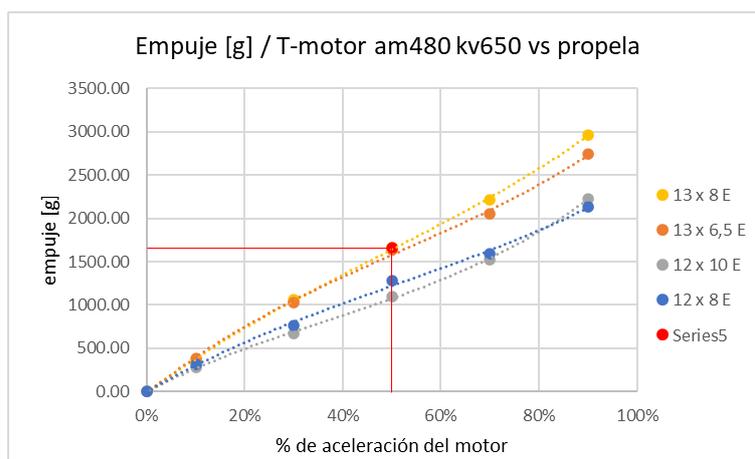


Figura 3.10. Empuje [g] vs % de aceleración / Fuente: Propia

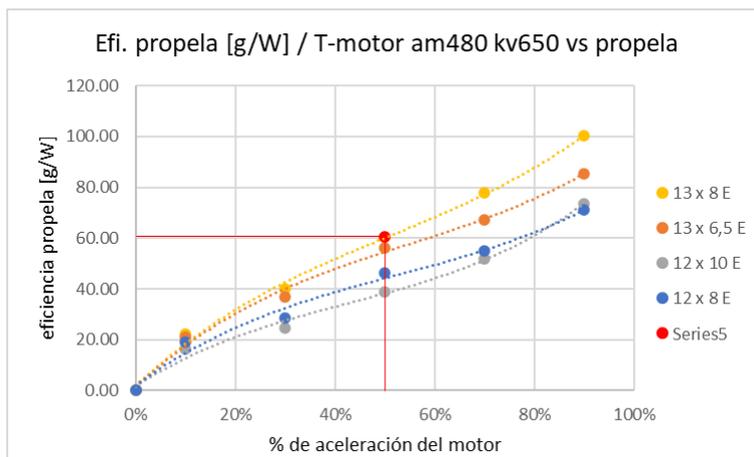


Figura 3.11. Eficiencia propela [g/W] vs % de aceleración / Fuente: Propia

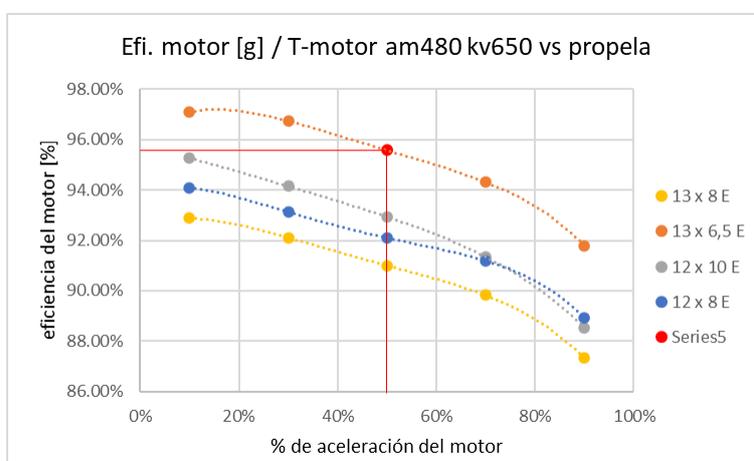


Figura 3.12. Eficiencia del motor [g] vs % de aceleración / Fuente: Propia

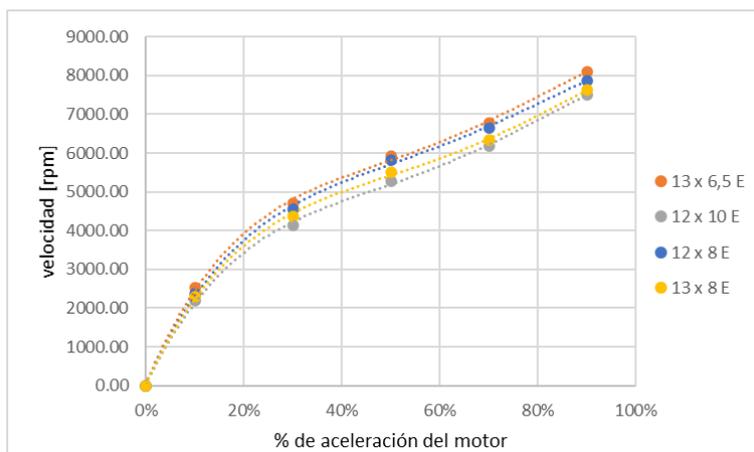


Figura 3.13. Velocidad [rpm] vs % de aceleración / Fuente: Propia

- T-Motor at3520 kv850

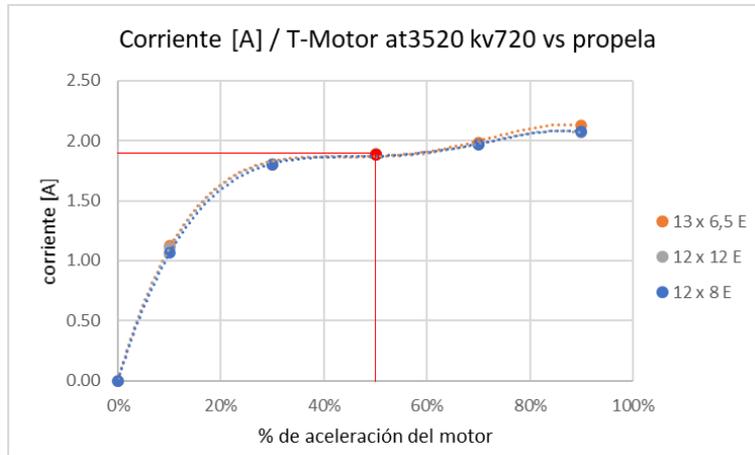


Figura 3.14. Corriente [A] vs % de aceleración / Fuente: Propia

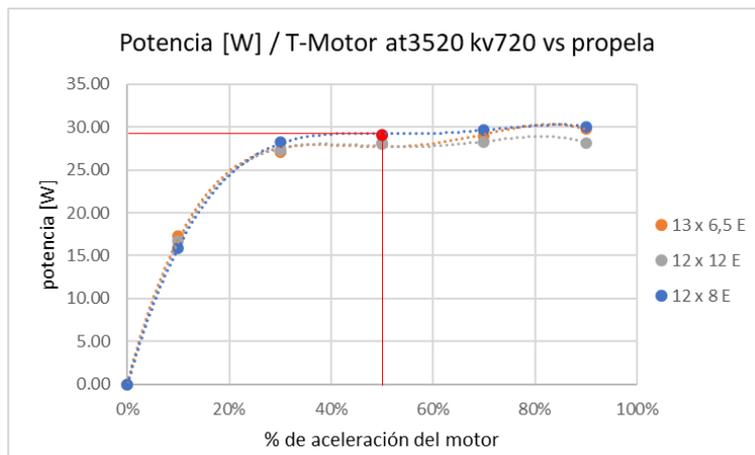


Figura 3.15. Potencia [W] vs % de aceleración / Fuente: Propia

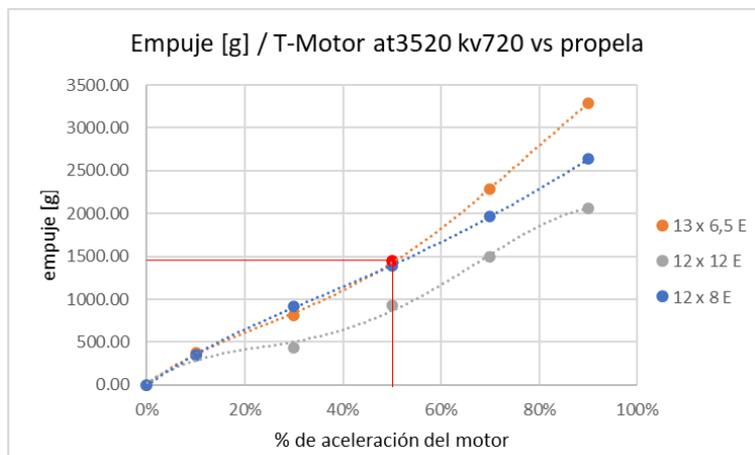


Figura 3.16. Empuje [g] vs % de aceleración / Fuente: Propia

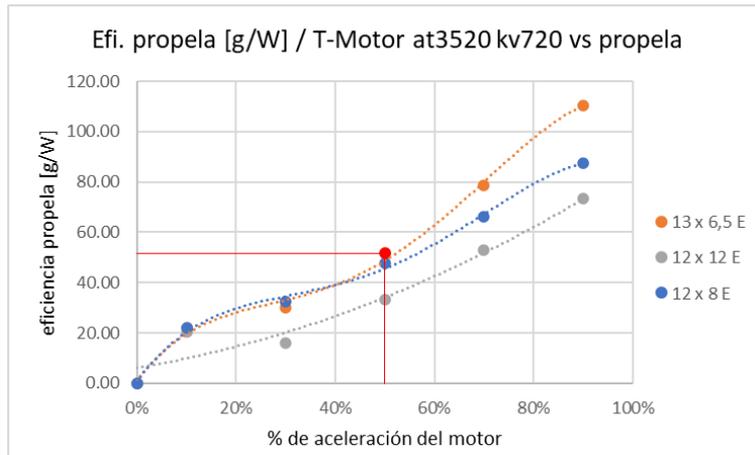


Figura 3.17. Eficiencia propela [g/W] vs % de aceleración / Fuente: Propia

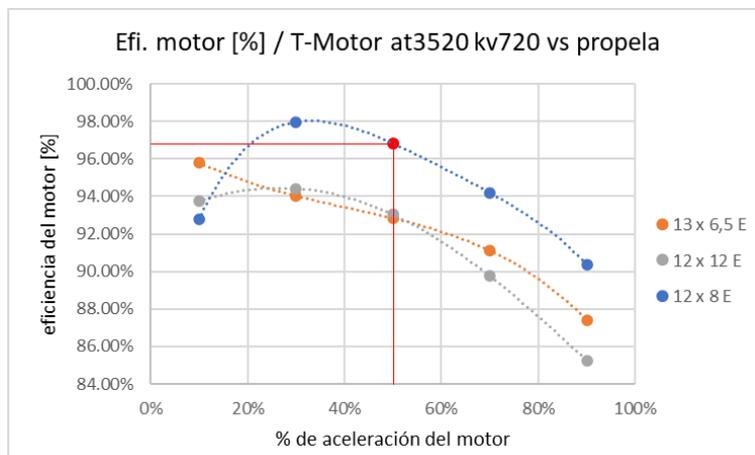


Figura 3.18. Eficiencia del motor [%] vs % de aceleración / Fuente: Propia

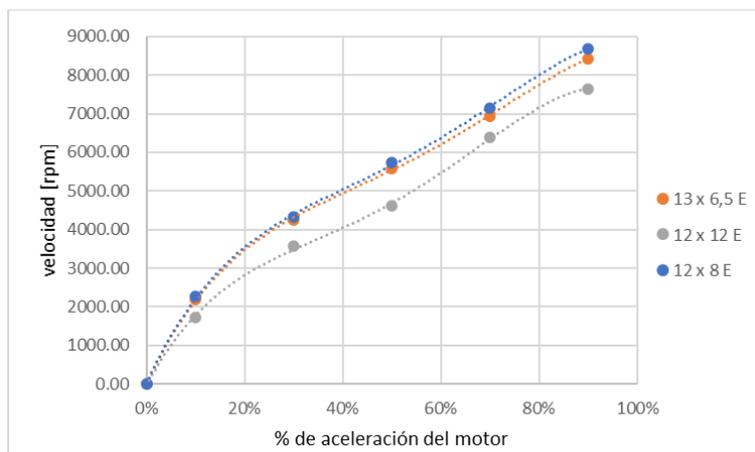


Figura 3.19. Velocidad [rpm] vs % de aceleración / Fuente: Propia

Para analizar las gráficas se va a tomar como referencia en todos los casos un 50% de aceleración.

- Amperaje [A]

En la Figura 3.2. para el motor T-Motor at3520 kv850 se tiene un amperaje de 1,90 [A] para la propela 12 x 8 E, mientras que en la Figura 3.8. el motor T-motor am480 kv650 tiene un consumo de 1,88 [A] en las propelas 12 x 8 E y 13 x 8 E, además, en la Figura 3.14. el motor T-Motor at3520 kv720 arroja un valor de 1,88 [A] en sus 3 propelas.

- Potencia [W]

En la Figura 3.3. el motor T-Motor at3520 kv850 alcanza la máxima potencia de 29,28 [W] para la propela 12 x 8 E, en tanto que en la Figura 3.9. el motor T-motor am480 kv650 alcanza su potencia máxima de 29,06 [W] con la propela 13 x 6,5 E, por último, en la Figura 3.15. el motor T-Motor at3520 kv720 arroja un valor máximo de 29,12 [W] con la propela 12 x 8 E.

- Empuje [g]

En la Figura 3.4. el motor T-Motor at3520 kv850 alcanza el máximo empuje de 1715,67 [g] con la propela 13 x 6,5 E, en cambio para el motor T-motor am480 kv650 en la Figura 3.10. alcanza su empuje máximo de 1665 [g] con la propela 13 x 8 E, finalmente, en la Figura 3.16. el motor T-Motor at3520 kv720 arroja un valor máximo de potencia de 1452 [g] con la propela 13 x 6,5 E.

- Eficiencia de la propela [g/W]

En la Figura 3.5. para la propela 13 x 6,5 E se tiene la mayor eficiencia con 61,64 [g/W], en la Figura 3.11. la propela 13 x 8 E arroja una eficiencia de 60,5 [g/W], en tanto, en la Figura 3.17. con la propela 13 x 6,5 E el valor máximo medido es 51,62 [g/W].

- Eficiencia del motor [%]

En la Figura 3.6. el motor T-Motor at3520 kv850 alcanza su mayor eficiencia de 95,81% con la propela 12 x 10 E, mientras que para el motor T-motor am480 kv650 en la Figura 3.12. alcanza su máxima eficiencia con un valor de 95,58% con la propela 13 x 6,5 E, finalmente, en la Figura 3.18. el motor T-Motor at3520 kv720 tiene una eficiencia máxima de 96,82% con la propela 12 x 8 E.

### 3.3 Metodología de selección

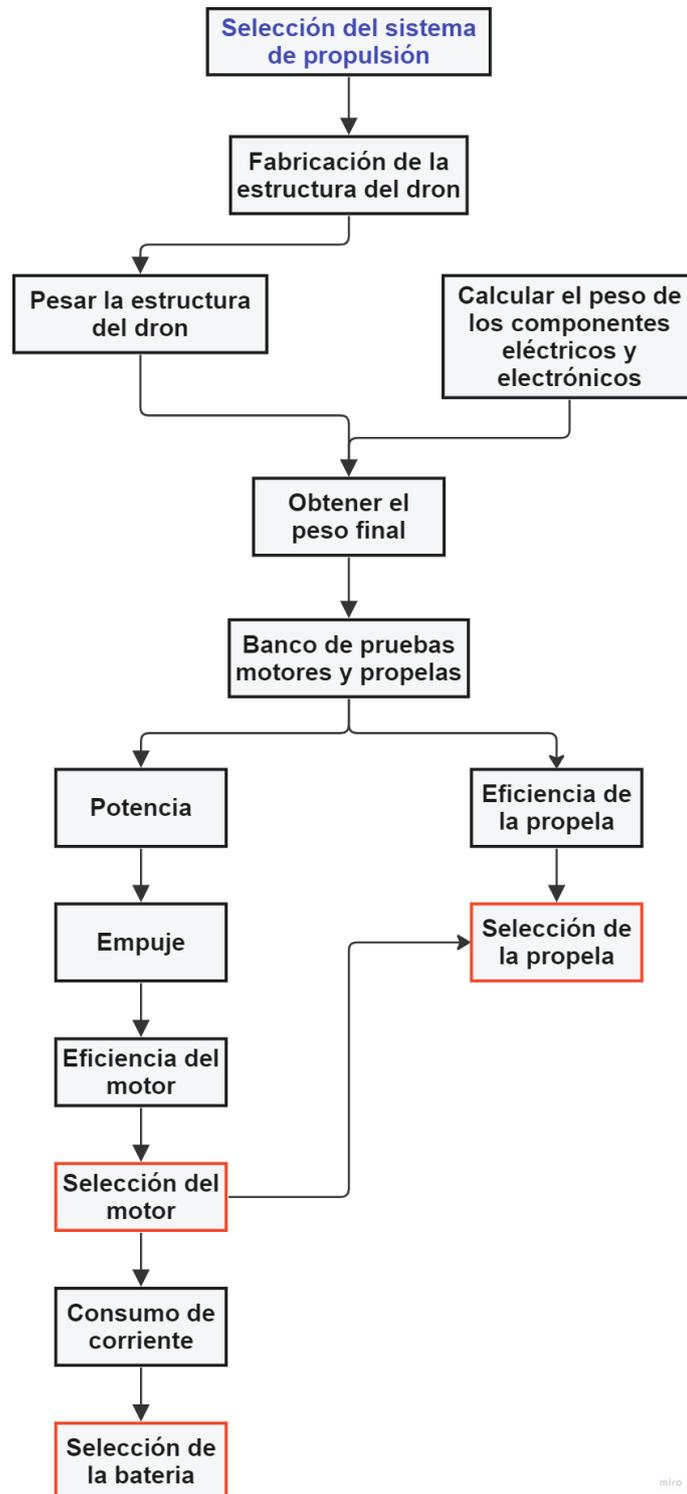


Figura 3.20. Metodología de selección del sistema de propulsión / Fuente: propia

Para empezar con la selección de los componentes del sistema de propulsión, se debe tener el modelo ya fabricado, es decir, la estructura del UAV VTOL. Luego basándose en el prototipo existente en el laboratorio, se tiene el valor correspondiente a los componentes eléctricos y electrónicos; y con ello un aproximado del peso final del prototipo mejorado. Entonces con ayuda del banco de prueba se obtiene los datos de corriente, empuje, potencia, eficiencia del motor y la propela. En este caso es importante considerar que el análisis se hace a un 50% de aceleración, por tal motivo, al 50% el empuje generado por los 3 motores al menos debe ser mayor que el peso total del prototipo para poder levantarlo. Entonces según las recomendaciones del fabricante y la eficiencia de la propela se escoge la mejor opción. Finalmente, se selecciona la batería la cual debe satisfacer las condiciones del motor, según la cantidad de miliamperios hora [mAh] dependerá la autonomía del dron, también se debe considerar que si los [mAh] aumentan el peso de la batería también y con ello la necesidad de un motor más grande.

### 3.4 Selección de componentes del sistema de propulsión

Con los datos obtenidos en el banco de pruebas se determina los elementos del sistema de propulsión eléctrica que tienen mejor desempeño para emplear en el prototipo mejorado.

#### Motor

En la Figura 3.21. se observa el motor seleccionado T-motor am480 kv650, en cuanto a la potencia todos los motores rodean los 29 [W] por lo que las 3 opciones resultan viables, además, la eficiencia del motor supera el 95%, por último, la principal razón de su elección es por tener el menor peso que su competencia lo que significa mayor autonomía y payload para el dron.



Figura 3.21. Motor T-motor am480 kv650 / Fuente: [21]

En la Figura 3.22. se especifica las características del motor:



Figura 3.22. Especificaciones motor T-motor am480 kv650 / Fuente: propia

### Propela

Para el motor T-Motor at3520 kv720 el fabricante recomienda usar las propelas 13 x 8 E y 14 x 7 E. Del análisis previo a este punto, la propela 13 x 8 E arroja el segundo valor más alto en empuje y eficiencia razón por la cual se escoge. Adicionalmente, en el LUAS (Laboratorio de Sistemas Aéreos No Tripulados) del grupo de investigación ATA-EPN de la Escuela Politécnica Nacional, no hay en stock la propela 14 x 7 E.



Figura 3.23. Propela 13 x 8 E / Fuente: [22]

Las características principales de la propela se muestran a continuación [22]:

- Diámetro de la hélice: 13 in (330,2 mm)
- Paso: 8 pulgadas (203,2 mm)
- Diámetro del cubo: 0,8 pulgadas (20,32 mm)
- Grosor del buje: 0,42 pulg. (10,668 mm)

- Diámetro del eje: 0,25 pulgadas (6,35 mm)
- Peso: 1,09 oz (30,9 g)
- Rotación: CCW (estándar/tractor)

### Batería

En el LUAS (Laboratorio de Sistemas Aéreos No Tripulados) del grupo de investigación ATA-EPN de la Escuela Politécnica Nacional, se tiene en stock baterías de 4 y 6 celdas, para el motor seleccionado se puede usar ambas, por lo tanto, se ha optado por la batería Tattu 6s de 10000 [mAh] la cual se muestra en la Figura 3.24.



Figura 3.24. Batería Tattu 6s de 10000 [mAh] / Fuente: [23]

Las especificaciones del producto son [23]:

- Capacidad: 10000mAh
- Configuración: 6S1P/ 22.2v
- Tasa de descarga: 30C
- Tasa máxima de descarga: 60C
- Peso: 1350g (±20g)
- Dimensiones: 176 x 66 x 58mm (largo x ancho x altura)

### 3.5 Diseño Final

Por último, se exhibe el UAV híbrido completo, que combina las características de un dron fixed wing (ala fija) y el sistema de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), con todos sus componentes ensamblados y listos para su operación.



Figura 3.24. Prototipo Final / Fuente: propia

## 4 CONCLUSIONES

Mediante una exhaustiva revisión bibliográfica y aprovechando la información proporcionada por el prototipo preexistente en el laboratorio, se diseñó exitosamente un modelo híbrido de ala fija con despegue y aterrizaje vertical, incorporando un mecanismo tilting en la parte superior de la cola.

Con el banco de pruebas se seleccionó el motor Motor T-motor am480 kv650 y la propela 13 x 8 E aptos para este prototipo, de igual manera se rediseñó el mecanismo tilting, brindando una rotación precisa y aumentando el desempeño del UAV.

La estructura de montaje del diseño preexistente poseía un exceso de peso por la fibra híbrida de carbono con kevlar colocada, lo que se solucionó en el actual diseño UAV VTOL incorporando fibra de vidrio localizada en las alas, lo que redujo el peso en 282%. De igual forma, por medio de software CAD se diseñó un soporte rígido y estable el cual se apoya en el fuselaje y facilita la perfecta adaptación de las alas a esta estructura.

A través de software CAD, se concibió una pieza mecánica que ejerce su función como taco Fischer, facilitando el ensamble al tener una conexión precisa entre la cola y el fuselaje. Además, la intersección de tubos de fibra de carbono del ala y el mecanismo tilting, bloquea cualquier movimiento o rotación indeseada entre las piezas.

## **5 RECOMENDACIONES**

Al momento de realizar el recubrimiento se recomienda dejar secar en su totalidad la resina por al menos 36 horas, ya que previo a este tiempo aún puede deformarse.

Se recomienda realizar los canales internos por donde pasan los cables, antes de fabricar las partes del dron, mientras que los canales externos deben realizarse antes del ensamblaje.

Al aplicar resina esta funciona como lubricante por lo que las piezas que se unen tienden a moverse de la posición deseada, por lo que se debe verificar su correcta posición y nivelación antes de dejar secar.

El perfilado del XPS debe realizarse con sobredimensionamiento, dado que con el calor de consume y además el proceso de lijado reduce considerablemente el material.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Jarra, «Sistema de diseño de drones,» 2016. [En línea]. Available: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6016/1/12335.pdf>. [Último acceso: 18 07 2023].
- [2] P. Baquero y René Vásquez, «EMPLEO DE LOS UAV, EN OPERACIONES DE SEGURIDAD Y VIGILANCIA EN LAS ÁREAS ESTRATÉGICAS EN EL ECUADOR,» 02 12 2018. [En línea]. Available: <http://geo1.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2019/02/art4-5.pdf>. [Último acceso: 18 07 2023].
- [3] Dron Experts, «Importancia de os drones en la actualidad y qué podemos esperar de ellos en el futuro,» 08 04 2021. [En línea]. Available: <https://dronexperts.es/importancia-de-los-drones-en-la-actualidad-y-que-podemos-esperar-de-ellos-en-el-futuro/>. [Último acceso: 18 07 2023].
- [4] Rao, Gaurav, Pradhyum, Suraj y Thejas, «Design and Analysis of a Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicle,» 08 2020. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/344356252\\_Design\\_and\\_Analysis\\_of\\_Fixed-Wing\\_UAV](https://www.researchgate.net/publication/344356252_Design_and_Analysis_of_Fixed-Wing_UAV). [Último acceso: 21 07 2023].
- [5] T. Fey, «An Analysis of the Contra-Rotating Propellers on the 1943 Radioplane OQ-2 Gunnery Target Drone,» 12 05 2014. [En línea]. Available: <https://www.enginehistory.org/Propellers/Contra/RighterOQ-2PropData/RighterOQ-2PropData.shtml>. [Último acceso: 21 07 2023].
- [6] T. Dewi, «Flight Test Data Analysis of Hybrid Vertical Take-off and Landing Unmanned Aerial Vehicle,» 09 2017. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/320075229\\_Flight\\_Test\\_Data\\_Analysis\\_of\\_Hybrid\\_Vertical\\_Take-off\\_and\\_Landing\\_Unmanned\\_Aerial\\_Vehicle](https://www.researchgate.net/publication/320075229_Flight_Test_Data_Analysis_of_Hybrid_Vertical_Take-off_and_Landing_Unmanned_Aerial_Vehicle). [Último acceso: 21 07 2023].
- [7] Avirtech, «Agriculture Multi Rotor vs. Fixed Wing Drones: Which to Use?,» 27 02 2023. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/agriculture-multi-rotor-vs-fixed-wing-drones-which-use-avirtech/>. [Último acceso: 23 07 2023].
- [8] M. Murison, «Ala fija o multirrotor,» 30 12 2020. [En línea]. Available: <https://enterprise-insights.dji.com/es/blog/drones-ala-fija-y-multirrotor#:~:text=Para%20empezar%2C%20los%20modelos%20de,caso%20de%20p%C3%A9rdida%20de%20potencia..> [Último acceso: 24 07 2003].

- [9] J. Rennie, «DRONE TYPES: MULTI-ROTOR VS FIXED-WING VS SINGLE ROTOR VS HYBRID VTOL,» 08 11 2016. [En línea]. Available: <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/#1>. [Último acceso: 23 07 2023].
- [10] Admirator, «Tricopter vs Quadcopter,» 06 01 2021. [En línea]. Available: <https://dronepedia.xyz/tricopter-vs-quadcopter/>. [Último acceso: 25 07 2023].
- [11] A. Mishra, «Different Types of Drone Frames: Monocopter to Octocopter,» 27 12 2021. [En línea]. Available: <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-drone-frames-monocopter-to-octocopter>. [Último acceso: 27 07 2023].
- [12] B. Kuhn, «VTOL Takes Off,» 22 04 2020. [En línea]. Available: <https://insideunmannedsystems.com/vtol-takes-off/>. [Último acceso: 28 07 2023].
- [13] H. Zhang, «Advantages and disadvantages of VTOL UAV,» 01 2019. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Advantages-and-disadvantages-of-VTOL-UAV-concepts-2\\_tbl1\\_335139740](https://www.researchgate.net/figure/Advantages-and-disadvantages-of-VTOL-UAV-concepts-2_tbl1_335139740). [Último acceso: 29 07 2023].
- [14] Wingtra, «Tailsitters vs. quadplanes – why a VTOL tailsitter is the best surveying drone for your mapping missions,» 29 11 2018. [En línea]. Available: <https://wingtra.com/tailsitters-vs-quadplanes-why-a-vtol-tailsitter-is-the-best-surveying-drone-for-your-mapping-missions/>. [Último acceso: 29 07 2023].
- [15] M. Quinteros y J. Sarango, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO DE ALA FIJA (UAV) CON UN SISTEMA DE DESPEGUE Y ATERRIZAJE VERTICAL (VTOL),» 12 2022. [En línea]. [Último acceso: 02 08 2023].
- [16] Rhonatherm, «Aislamiento EPS Vs Aislamiento poliestireno extruido XPS,» 23 05 2022. [En línea]. Available: <https://www.saterhonatherm.com/blog/aislamiento-eps-placas-poliestireno-extruido/>. [Último acceso: 03 08 2023].
- [17] Quantum, «Advanced professional mapping UAS and ISR UAS (drones),» 2023. [En línea]. Available: <https://quantum-systems.com/>. [Último acceso: 04 08 2023].
- [18] J. Hernández y J. Nandar, «IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL SISTEMA DE PROPULSIÓN DE UN UAV DE ALA FIJA ENFOCADO A LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE CONSUMO DE ENERGÍA,» 11 2021. [En línea]. [Último acceso: 05 08 2023].
- [19] B. Charles, «How to Measure Brushless Motor and Propeller Efficiency,» 16 08 2022. [En línea]. Available: <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-to-measure-brushless-motor-and-propeller-efficiency>. [Último acceso: 06 08 2023].

[20] CubePilot, 2023. [En línea]. Available: <https://docs.cubepilot.org/user-guides/cubepilot-ecosystem/cubepilot-ecosystem-autopilot-wiring-diagram>. [Último acceso: 08 08 2023].

[21] T-motor, «T-motor am480 kv650,» 2023. [En línea]. Available: <https://store.tmotor.com/goods-1167-AM480+3D.html>. [Último acceso: 10 08 2023].

[22] Adrenaline, «Propela 13 x 8 E,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.adrenalineracing.com/products/apc-electric-propeller-13-x-8e>. [Último acceso: 10 08 2023].

[23] Genstattu, «Tattu 22.2V 30C 6S 10000mAh Lipo Battery Pack With EC5 Plug For UAV Drone,» 2023. [En línea]. Available: <https://genstattu.com/ta-30c-10000-6s1p-ec5.html>. [Último acceso: 10 08 2023].

## 7 ANEXOS

### ANEXO I: BANCO DE PRUEBAS MOTORES Y PROPELAS

#### T-Motor at3520 kv850

Para el motor T-Motor at3520 kv850 se realizó 3 diferentes configuraciones con:

- Propela 13 x 6,5 E

Tabla 5.1. Prueba 1 / T-Motor at3520 kv850 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.10	16.81	372.00	22.13	95.51%	2492.00
30%	1.80	27.18	1048.00	38.56	94.38%	4867.00
50%	1.92	28.32	1746.00	61.65	92.19%	6140.00
70%	2.04	28.96	2546.00	87.91	88.73%	7604.50
90%	2.24	29.58	3426.00	115.82	82.53%	8946.50

Fuente: propia

Tabla 5.2. Prueba 2 / T-Motor at3520 kv850 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	2	2	2	2	2	2
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.05	15.74	373.00	23.70	93.69%	2432.50
30%	1.81	26.72	1019.00	38.14	92.27%	4628.00
50%	1.89	27.37	1695.00	61.93	90.51%	5979.00
70%	2.04	28.41	2487.00	87.54	87.04%	7375.00
90%	2.22	28.94	3319.00	114.69	81.48%	8812.50

Fuente: propia

Tabla 5.3. Prueba 3 / T-Motor at3520 kv850 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	3	3	3	3	3	3
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.07	16.06	372.00	23.16	93.81%	2395.00
30%	1.81	26.86	1063.00	39.58	92.75%	4824.00
50%	1.92	27.81	1706.00	61.34	90.53%	6207.00
70%	2.05	28.56	2478.00	86.76	87.07%	7508.50
90%	2.22	29.03	3331.00	114.74	81.73%	8843.00

Fuente: propia

Tabla 5.4. Promedio / T-Motor at3520 kv850 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.07	16.20	372.33	23.00	94.34%	2439.83
30%	1.81	26.92	1043.33	38.76	93.13%	4773.00
50%	1.91	27.83	1715.67	61.64	91.07%	6108.67
70%	2.04	28.64	2503.67	87.41	87.61%	7496.00
90%	2.23	29.18	3358.67	115.08	81.91%	8867.33

Fuente: propia

- Propela 12 x 10 E

Tabla 5.5. Prueba 1 / T-Motor at3520 kv850 con propela 12 x 10 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.12	16.09	382.00	23.74	89.79%	2321.50
30%	1.81	28.80	880.00	30.56	99.45%	4294.50
50%	1.90	29.47	1498.00	50.83	96.94%	5804.00
70%	2.01	29.67	2185.00	73.64	92.26%	7240.50
90%	2.17	29.78	2782.00	93.42	85.77%	8644.50

Fuente: propia

Tabla 5.6. Prueba 2 / T-Motor at3520 kv850 con propela 12 x 10 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.07	16.00	406.00	25.38	93.43%	2387.50
<b>30%</b>	1.86	28.98	771.00	26.60	97.38%	4490.00
<b>50%</b>	1.92	29.20	1393.00	47.71	95.05%	5977.50
<b>70%</b>	2.02	29.43	2079.00	70.64	91.06%	7351.00
<b>90%</b>	2.18	28.68	2631.00	91.74	82.22%	8064.00

Fuente: propia

Tabla 5.7. Prueba 3 / T-Motor at3520 kv850 con propela 12 x 10 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.09	16.29	416.00	25.54	93.39%	2354.50
<b>30%</b>	1.82	28.64	839.00	29.29	98.35%	4344.50
<b>50%</b>	1.91	29.17	1423.00	48.78	95.45%	5835.00
<b>70%</b>	2.02	29.12	2030.00	69.71	90.10%	7322.00
<b>90%</b>	2.21	28.66	2593.00	90.47	81.05%	8128.00

Fuente: propia

Tabla 5.8. Promedio / T-Motor at3520 kv850 con propela 12 x 10 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.09	16.12	401.33	24.89	92.20%	2354.50
<b>30%</b>	1.83	28.81	830.00	28.82	98.39%	4376.33
<b>50%</b>	1.91	29.28	1438.00	49.11	95.81%	5872.17
<b>70%</b>	2.02	29.41	2098.00	71.33	91.14%	7304.50
<b>90%</b>	2.19	29.04	2668.67	91.88	83.02%	8278.83

Fuente: propia

- Propela 12 x 8 E

Tabla 5.9. Prueba 1 / T-Motor at3520 kv850 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.04	15.18	367.00	24.18	91.23%	2415.00
30%	1.80	26.18	896.00	34.22	90.90%	4606.00
50%	1.90	26.98	1463.00	54.23	88.75%	6117.00
70%	2.01	27.80	2095.00	75.36	86.44%	7481.00
90%	2.15	28.35	2861.00	100.92	82.41%	8892.00

Fuente: propia

Tabla 5.10. Prueba 2 / T-Motor at3520 kv850 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	2	2	2	2	2	2
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.06	15.38	390.00	25.36	90.68%	2410.00
30%	1.80	25.92	900.00	34.72	90.00%	4603.00
50%	1.89	26.70	1477.00	55.32	88.29%	6054.00
70%	1.99	27.20	2000.00	73.53	85.43%	7348.00
90%	2.13	27.26	2762.00	101.32	79.99%	8640.00

Fuente: propia

Tabla 5.11. Prueba 3 / T-Motor at3520 kv850 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	3	3	3	3	3	3
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.06	15.66	400.00	25.54	92.33%	2429.00
30%	1.81	26.52	904.00	34.09	91.57%	4644.00
50%	1.90	26.95	1475.00	54.73	88.65%	6051.00
70%	2.00	27.98	2014.00	71.98	87.44%	7448.00
90%	2.13	28.17	2773.00	98.44	82.66%	8790.00

Fuente: propia

Tabla 5.12. Promedio / T-Motor at3520 kv850 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.05	15.41	385.67	25.03	91.41%	2418.00
30%	1.80	26.21	900.00	34.34	90.83%	4617.67
50%	1.90	26.88	1471.67	54.76	88.56%	6074.00
70%	2.00	27.66	2036.33	73.62	86.44%	7425.67
90%	2.14	27.93	2798.67	100.23	81.69%	8774.00

Fuente: propia

### T-Motor at3520 kv720

- Propela 12 x 12 E

Tabla 5.13. Prueba 1 / T-Motor at3520 kv720 con propela 12 x 12 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.11	16.87	292.00	17.31	94.99%	2165.00
30%	1.80	27.09	688.00	25.40	94.06%	4136.00
50%	1.90	28.08	1105.00	39.35	92.37%	5275.00
70%	2.00	29.10	1524.00	52.37	90.94%	6175.00
90%	2.13	30.08	2219.00	73.77	88.26%	7459.00

Fuente: propia

Tabla 5.14. Prueba 2 / T-Motor at3520 kv720 con propela 12 x 12 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	2	2	2	2	2	2
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.16	17.78	260.00	14.62	95.80%	2236.00
30%	1.81	27.35	652.00	23.84	94.44%	4170.00
50%	1.90	28.43	1085.00	38.16	93.52%	5228.00
70%	2.02	29.67	1514.00	51.03	91.80%	6248.00
90%	2.15	30.61	2239.00	73.15	88.98%	7518.00

Fuente: propia

Tabla 5.15. Prueba 3 / T-Motor at3520 kv720 con propela 12 x 12 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	3	3	3	3	3	3
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.11	16.88	283.00	16.77	95.05%	2162.00
30%	1.81	27.21	682.00	25.06	93.96%	4141.00
50%	1.89	28.10	1107.00	39.40	92.92%	5302.00
70%	2.01	29.36	1538.00	52.38	91.29%	6156.00
90%	2.12	29.98	2204.00	73.52	88.38%	7500.00

Fuente: propia

Tabla 5.16. Promedio / T-Motor at3520 kv720 con propela 12 x 12 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.13	17.18	278.33	16.23	95.28%	2187.67
30%	1.81	27.22	674.00	24.77	94.15%	4149.00
50%	1.90	28.20	1099.00	38.97	92.94%	5268.33
70%	2.01	29.38	1525.33	51.93	91.34%	6193.00
90%	2.13	30.22	2220.67	73.48	88.54%	7492.33

Fuente: propia

- Propela 12 x 8 E

Tabla 5.17. Prueba 1 / T-Motor at3520 kv720 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.09	16.45	310.00	18.84	94.32%	2369.00
30%	1.81	27.00	761.00	28.19	93.23%	4509.00
50%	1.86	27.48	1278.00	46.51	92.34%	5832.00
70%	1.96	28.63	1604.00	56.03	91.29%	6664.00
90%	2.10	29.95	2149.00	71.75	89.14%	7836.00

Fuente: propia

Tabla 5.18. Prueba 2 / T-Motor at3520 kv720 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.08	16.33	315.00	19.29	94.50%	2391.00
<b>30%</b>	1.81	26.93	770.00	28.59	92.99%	4570.00
<b>50%</b>	1.89	27.82	1272.00	45.72	92.00%	5796.00
<b>70%</b>	1.99	29.06	1588.00	54.65	91.27%	6644.00
<b>90%</b>	2.12	30.14	2123.00	70.44	88.86%	7902.00

Fuente: propia

Tabla 5.19. Prueba 3 / T-Motor at3520 kv720 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.07	16.00	308.00	19.25	93.46%	2394.00
<b>30%</b>	1.81	26.98	771.00	28.58	93.16%	4569.00
<b>50%</b>	1.89	27.81	1288.00	46.31	91.96%	5802.00
<b>70%</b>	1.99	28.98	1583.00	54.62	91.02%	6654.00
<b>90%</b>	2.11	29.97	2120.00	70.74	88.77%	7897.00

Fuente: propia

Tabla 5.20. Promedio / T-Motor at3520 kv720 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.08	16.26	311.00	19.13	94.09%	2384.67
<b>30%</b>	1.81	26.97	767.33	28.45	93.13%	4549.33
<b>50%</b>	1.89	27.70	1279.33	46.18	92.10%	5810.00
<b>70%</b>	1.98	28.89	1591.67	55.10	91.19%	6654.00
<b>90%</b>	2.11	30.02	2130.67	70.98	88.92%	7878.33

Fuente: propia

## T-motor am480 kv650

En el motor T-motor am480 kv650 se realizó 4 configuraciones las cuales son:

- Propela 13 x 8 E

Tabla 5.21. Prueba 1 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 13 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.05	15.53	360.00	23.18	92.44%	2346.00
30%	1.81	26.63	1085.00	40.74	91.95%	4381.00
50%	1.89	27.44	1674.00	61.01	90.74%	5536.00
70%	1.98	28.37	2217.00	78.15	89.55%	6379.00
90%	2.12	29.57	2971.00	100.47	87.18%	7668.00

Fuente: propia

Tabla 5.22. Prueba 2 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 13 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	2	2	2	2	2	2
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.04	15.56	318.00	20.44	93.51%	2307.00
30%	1.81	26.65	1036.00	38.87	92.02%	4353.00
50%	1.89	27.59	1638.00	59.37	91.24%	5513.00
70%	1.99	28.60	2205.00	77.10	89.82%	6346.00
90%	2.12	29.65	2974.00	100.30	87.41%	7648.00

Fuente: propia

Tabla 5.23. Prueba 3 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 13 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	3	3	3	3	3	3
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.07	15.87	359.00	22.62	92.70%	2250.00
30%	1.80	26.60	1067.00	40.11	92.36%	4339.00
50%	1.89	27.53	1683.00	61.13	91.04%	5492.00
70%	1.96	28.25	2219.00	78.55	90.08%	6264.00
90%	2.09	29.22	2927.00	100.17	87.38%	7587.00

Fuente: propia

Tabla 5.24. Promedio / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 13 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.05	15.65	345.67	22.08	92.88%	2301.00
30%	1.81	26.63	1062.67	39.91	92.11%	4357.67
50%	1.89	27.52	1665.00	60.50	91.01%	5513.67
70%	1.98	28.41	2213.67	77.93	89.82%	6329.67
90%	2.11	29.48	2957.33	100.32	87.32%	7634.33

Fuente: propia

- Propela 13 x 6,5 E

Tabla 5.25. Prueba 1 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.14	17.59	379.00	21.55	96.41%	2201.00
30%	1.81	27.35	854.00	31.22	94.44%	4281.00
50%	1.91	28.50	1530.00	53.68	93.26%	5625.00
70%	2.01	29.44	2330.00	79.14	91.54%	6977.00
90%	2.15	30.27	3267.00	107.93	87.99%	8406.00

Fuente: propia

Tabla 5.26. Prueba 2 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	2	2	2	2	2	2
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.12	17.07	378.00	22.14	95.68%	2193.00
30%	1.80	27.09	763.00	28.17	94.06%	4253.00
50%	1.89	28.04	1359.00	48.47	92.72%	5580.00
70%	1.98	28.83	2236.00	77.56	91.00%	6939.00
90%	2.12	29.65	3333.00	112.41	87.41%	8460.00

Fuente: propia

Tabla 5.27. Prueba 3 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	3	3	3	3	3	3
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.13	17.15	380.50	22.19	95.28%	2185.00
30%	1.80	26.95	820.00	30.43	93.58%	4243.00
50%	1.88	27.83	1467.00	52.71	92.52%	5554.00
70%	1.97	28.61	2272.00	79.41	90.77%	6913.00
90%	2.11	29.31	3250.00	110.88	86.82%	8417.00

Fuente: propia

Tabla 5.28. Promedio / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 13 x 6,5 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.13	17.27	379.17	21.96	95.79%	2193.00
30%	1.80	27.13	812.33	29.94	94.03%	4259.00
50%	1.89	28.12	1452.00	51.62	92.83%	5586.33
70%	1.99	28.96	2279.33	78.70	91.10%	6943.00
90%	2.13	29.74	3283.33	110.41	87.41%	8427.67

Fuente: propia

- Propela 12 x 10 E

Tabla 5.29. Prueba 1 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 12 x 10 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.12	16.48	337.00	20.45	92.38%	1837.00
30%	1.81	27.56	510.00	18.51	95.17%	3589.00
50%	1.89	28.26	938.00	33.19	93.45%	4877.00
70%	1.97	28.54	1531.00	53.64	90.55%	6443.00
90%	2.08	28.56	2104.00	73.67	85.82%	7699.00

Fuente: propia

Tabla 5.30. Prueba 2 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 12 x 10 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.12	16.89	333.00	19.72	94.66%	1509.00
<b>30%</b>	1.81	27.23	243.00	8.92	94.03%	3562.00
<b>50%</b>	1.88	27.98	929.00	33.20	93.02%	4152.00
<b>70%</b>	1.97	28.24	1467.00	51.95	89.59%	6364.00
<b>90%</b>	2.07	28.24	2063.00	73.05	85.27%	7626.00

Fuente: propia

Tabla 5.31. Prueba 3 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 12 x 10 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.10	16.58	349.50	21.08	94.22%	1810.00
<b>30%</b>	1.80	27.09	547.00	20.19	94.06%	3537.00
<b>50%</b>	1.87	27.71	918.00	33.13	92.61%	4803.00
<b>70%</b>	1.96	27.95	1476.00	52.81	89.13%	6336.00
<b>90%</b>	2.05	27.77	2031.00	73.14	84.66%	7616.00

Fuente: propia

Tabla 5.32. Promedio / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 12 x 10 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.11	16.65	339.83	20.41	93.75%	1718.67
<b>30%</b>	1.81	27.29	433.33	15.87	94.42%	3562.67
<b>50%</b>	1.88	27.98	928.33	33.17	93.03%	4610.67
<b>70%</b>	1.97	28.24	1491.33	52.80	89.76%	6381.00
<b>90%</b>	2.07	28.19	2066.00	73.29	85.25%	7647.00

Fuente: propia

- Propela 12 x 8 E

Tabla 5.33. Prueba 1 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	1	1	1	1	1	1
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.07	15.82	338.50	21.40	92.81%	2204.00
30%	1.80	27.93	908.00	32.51	96.98%	4278.00
50%	1.87	28.66	1361.00	47.49	95.79%	5712.00
70%	1.96	29.24	1903.00	65.08	93.24%	7096.00
90%	2.06	29.52	2581.00	87.43	89.56%	8625.00

Fuente: propia

Tabla 5.34. Prueba 2 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	2	2	2	2	2	2
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.07	15.86	352.50	22.23	92.61%	2285.00
30%	1.80	28.51	926.00	32.48	98.99%	4364.00
50%	1.87	29.31	1406.00	47.97	97.96%	5783.00
70%	1.96	29.85	2022.00	67.74	95.18%	7212.00
90%	2.07	30.17	2693.00	89.26	91.09%	8747.00

Fuente: propia

Tabla 5.35. Prueba 3 / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	3	3	3	3	3	3
0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
10%	1.07	15.83	354.00	22.36	92.90%	2315.00
30%	1.80	28.21	907.00	32.15	97.95%	4310.00
50%	1.90	29.40	1393.00	47.38	96.71%	5713.00
70%	1.99	29.99	1978.00	65.96	94.19%	7139.00
90%	2.11	30.54	2625.00	85.95	90.46%	8680.00

Fuente: propia

Tabla 5.36. Promedio / T-motor am480 kv650 kv720 con propela 12 x 8 E

Porcentaje de aceleración	Corriente [A]	Potencia [W]	Empuje [g]	Eficiencia Propela [g/W]	Eficiencia del motor %	Velocidad [RPM]
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
<b>0%</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	0.00
<b>10%</b>	1.07	15.83	348.33	22.00	92.77%	2268.00
<b>30%</b>	1.80	28.22	913.67	32.38	97.97%	4317.33
<b>50%</b>	1.88	29.12	1386.67	47.61	96.82%	5736.00
<b>70%</b>	1.97	29.69	1967.67	66.26	94.20%	7149.00
<b>90%</b>	2.08	30.08	2633.00	87.55	90.37%	8684.00

Fuente: propia