



**REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DE
MOTORES DEL DRON TAROT 650, PARA MEJORAR LA
ESTABILIDAD Y EL RENDIMIENTO DE VUELO**

Ángel Solano Arango

Santiago Ospina Mira

Pedro Luis Sierra Rodriguez

Institución Universitaria Pascual Bravo
Facultad de ingeniería, Departamento de mecánica
Medellín, Colombia
2025

**REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DE
MOTORES DEL DRON TAROT 650, PARA MEJORAR LA
ESTABILIDAD Y EL RENDIMIENTO DE VUELO**

Ángel Solano Arango

Santiago Ospina Mira

Pedro Luis Sierra Rodriguez

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Tecnólogo en Mecánica Industrial

Director(a):

MSc. Julian Mora Orozco

Institución Universitaria Pascual Bravo
Facultad de ingeniería, Departamento de mecánica
Medellín, Colombia

2025

“La presente investigación se la dedicamos a todos los docentes que nos enseñaron conocimiento útil y productivo, que nos enseñaron los valores del estudio y el ser un buen profesional. Dedicamos también este trabajo a nuestros compañeros que nos apoyaron y con los cuales compartimos diferentes momentos en esta tecnología, de ellos también aprendimos mucho.”

Esta investigación está dedicada a todo aquel que en algún momento requiera una guía de drones, componentes mecánicos de este y análisis estructurales, esperamos esto en alguna circunstancia te ayude.

Ángel Solano A.; Santiago Ospina M. y Pedro Luis Sierra R.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros familiares por haber creído en nosotros, habernos apoyado como pudieron, a las personas que aportaron su conocimiento, experiencia y sabiduría en este trabajo, y en la vida en general.

Resumen

El presente trabajo se centra en el análisis, rediseño y optimización de los soportes de motor y brazos del dron Tarot 650 perteneciente a la Institución Universitaria Pascual Bravo, con el objetivo de mejorar su desempeño estructural y la estabilidad en vuelo. Para ello, se evaluaron los requerimientos mecánicos del sistema, considerando resistencia a la fatiga, comportamiento frente a cargas distribuidas y deformación bajo empuje y torsión generados por el conjunto motor-hélice. Se emplearon herramientas de modelado 3D y simulación por elementos finitos para analizar la respuesta del brazo original y comparar su desempeño con un brazo modificado que incorpora un mecanismo de bloqueo mecánico contra la rotación. Los resultados indican que el rediseño reduce considerablemente el deslizamiento torsional observado en el brazo original y mejora la fiabilidad del soporte del motor, aunque introduce aumentos en desplazamientos y nuevas concentraciones de esfuerzos que requieren una futura optimización. En conjunto, los análisis confirman que el nuevo diseño puede soportar las condiciones de carga esperadas sin comprometer la estabilidad del vuelo, siempre que se implementen ajustes adicionales en la siguiente iteración.

Abstract

The present work focuses on the analysis, redesign, and optimization of the motor mounts and arms of the Tarot 650 drone belonging to the Pascual Bravo University Institution, with the goal of improving its structural performance and flight stability. To achieve this, the mechanical requirements of the system were evaluated, considering fatigue resistance, behavior under distributed loads, and deformation under the thrust and torsion generated by the motor-propeller assembly. 3D modeling tools and finite element simulation were used to analyze the response of the original arm and compare its performance with a modified arm that incorporates a mechanical locking mechanism against rotation. The results indicate that the redesign significantly reduces the torsional slippage observed in the original arm and improves the reliability of the motor mount, although it introduces increases in displacements and new stress concentrations that require further optimization. Overall, the analyses confirm that the new design can withstand the expected loading conditions without compromising flight stability, provided that additional adjustments are implemented in the next iteration.

Keywords – Drone, structural analysis , analysis of pieces, structural

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Drones y su estructura:	6
2.2. Estructura del dron	7
2.2.1. Marco o chasis	7
2.2.2. Materiales	8
2.2.2.1. Fibra de carbono:	8
2.2.2.2. Aleación de Aluminio 6061:	9
2.2.2.3. Polímeros de ingeniería (PA66 “Nylon”, ABS, UHMWPE):	10
2.2.3. Motores	11
2.2.3.1. Motores sin Escobillas (Brushless):	12
2.2.3.2. Motores con Escobillas (Brushed):	12
2.2.3.3. Características Clave de los Motores para Drones:	13
2.2.4. Hélices	14
2.2.4.1. Tipos de Hélices para Drones:	14
2.2.4.2. Parámetros Técnicos de las Hélices:	15
2.2.5. Batería	15
2.2.6. Placa controladora de vuelo	16
2.2.7. Cámara	16
2.2.7.1. Tipos de Cámaras en Drones:	16
2.2.8. Análisis de Elementos Finitos (FEA)	17
2.2.8.1. Análisis Estático	18
2.2.8.2. Características Claves en un Análisis Estático	19
2.2.9. Software CAD/CAE	20
2.2.9.1. SolidWorks	20
2.2.9.2. Autodesk Fusion 360	21
2.2.9.3. Siemens NX	21

2.2.9.4.	ANSYS	22
3.	Metodología	24
3.1.	Análisis del Diseño Actual	24
3.1.0.1.	Resumen en tabla	27
3.2.	Análisis por Elementos Finitos (CAE)	27
3.2.1.	Modelo 3D del brazo original	28
3.2.2.	Piezas que componen el brazo	28
3.2.2.1.	Soporte de fijación del brazo al dron	29
3.2.2.2.	Operaciones requeridas	30
3.2.2.3.	Perfil tubular redondo	30
3.2.2.4.	Abrazaderas de motor al tubo	31
3.2.2.5.	Platina de fijación del motor	32
3.3.	Cálculos de fuerzas de empuje del Motor T-Motor MN3510 KV700 (4S, Hélice 30.72 cm)	33
3.3.1.	Potencia máxima del motor	33
3.3.2.	Cálculo de RPM (estimado)	33
3.3.3.	Cálculo de potencia eléctrica útil	34
3.3.4.	Cálculo del torque	34
3.3.5.	Cálculo del empuje E	35
3.3.6.	Resumen de valores finales	35
3.3.7.	Fórmulas utilizadas	36
3.3.8.	Sistema de coordenadas y transmisión de cargas	36
3.3.9.	Análisis de los momentos debidos al empuje	36
3.3.10.	Aplicación en FEA	37
3.4.	Diagrama de cuerpo libre	37
3.5.	Análisis estático del brazo original del dron Tarot 450	37
3.5.1.	Preparación del modelo <code>.fem</code>	38
3.5.2.	Gestión y asignación de materiales	39
3.5.3.	Definición de mallas	40
3.5.4.	Definición de conexiones y condiciones de contacto	44
3.6.	Propuesta de Rediseño	45
3.6.1.	Propuesta de rediseño 1	45
3.6.1.1.	Nuevo brazo tubular	46
3.6.1.2.	Nuevo soporte de sujeción del motor	47
3.6.1.3.	Nuevo sujetador del brazo	48
3.6.2.	Propuesta de rediseño 2	49
3.6.2.1.	Brazo tubular propuesta 2	51
3.6.2.2.	Propuesta 2 soporte de sujeción del motor	52
3.6.2.3.	Nuevo sujetador del brazo	53
3.7.	Análisis CAE del brazo prototipo propuesta 2	53
3.8.	Prototipo y Pruebas Experimentales	54
4.	Análisis	57
4.1.	Análisis Comparativo de Resultados (FEA) de Diseños de Brazo	57
4.1.1.	Resultados Cuantitativos	57
4.2.	Análisis Comparativo del Rendimiento	58
4.2.1.	Modo de Falla Torsional (Rigidez vs. Desgaste)	58
4.2.2.	Rigidez Estructural (Flexión)	60
4.2.3.	Resistencia Estructural (Esfuerzos de Von Mises)	61

5. Discusión	63
5.1. Discusión de Resultados	63
6. Conclusiones y recomendaciones	65
6.1. Conclusiones	65
6.2. Recomendaciones	65
Referencias	67

Índice de figuras

1.0.1.Tarot 650 propiedad de la IUPB. Fuente: propia	2
2.1.1.Dron Típico. Fuente: HomeTechnology	6
2.2.1.Marco o estructura del dron. (Fuente: Elaboracion propia)	7
2.2.2.Fibras de carbono, fuente: Xataka	8
2.2.3.Esquema básico de un motor de un dron	11
2.2.4.Tipos de helices	14
2.2.5.Bateria de litio	15
2.2.6.Placa controladora de vuelo	16
2.2.7.Camara de reconocimiento termico	17
2.2.8.Análisis estático lineal. (Fuente: Elaboración propia)	18
3.1.1.Vista superior del motor y hélice con medidas principales. (Fuente: Elaboración propia)	25
3.1.2.Abrazadera en ABS con dimensiones generales. (Fuente: Elaboración propia) . . .	25
3.1.3.Soporte del motor con abrazadera de sujeción de cables. (Fuente: Elaboración propia)	26
3.1.4.Unión del brazo al cuerpo central del dron (impreso en ABS). (Fuente: Elaboración propia)	26
3.1.5.Vista superior del soporte de motor con medidas detalladas. (Fuente: Elaboración propia)	27
3.2.1.Modelo idéntico en vista isométrica. Fuente: Propia.	28
3.2.2.Soporte de fijación en vista isométrica. Fuente: Propia.	29
3.2.3.Soporte de fijación del brazo: operaciones realizadas en el programa. Fuente: Propia.	30
3.2.4.Perfil tubular en vista isométrica. Fuente: Propia.	30
3.2.5.Perfil tubular: operaciones realizadas en el programa. Fuente: Propia.	31
3.2.6.Abrazaderas de tubo en vista isométrica. Fuente: Propia.	31
3.2.7.Operaciones de las abrazaderas de tubo. Fuente: Propia.	32
3.2.8.Platina de fijación del motor en vista isométrica. Fuente: Propia.	32
3.2.9.Operaciones de la platina de fijación del motor. Fuente: Propia.	33
3.4.1.Diagrama de cuerpo libre del brazo del dron. Elaboración propia	37
3.5.1.Brazo original en vista isométrica con cargas. Fuente: propia.	38
3.5.2.Archivo .fem con lista de operaciones. Fuente: propia.	39
3.5.3.Gestor de materiales, Inspección de material ABS. Fuente: propia.	39
3.5.4.Inspección de material: fibra de carbono. Fuente: propia.	40
3.5.5.Recolector de mallas. Fuente: propia.	40
3.5.6.Recolector de mallas 1D. Fuente: propia.	41
3.5.7.Recolector de malla tetraédrica 3D para material ABS. Fuente: propia.	41
3.5.8.Interfaz de edición de malla (material ABS). Fuente: propia.	42

3.5.9.Piezas de ensamblaje con material ABS. Fuente: propia.	43
3.5.10Interfaz de edición de malla, malla de la placa soporte motor con elementos TETRA(10) (fibra de carbono – lámina). Fuente: propia.	43
3.5.11Interfaz de edición de malla, mallado del brazo con elementos CHEXA(8) (fibra de carbono – tubo). Fuente: propia.	44
3.5.12Conexión tipo nodo 1D. Fuente: propia.	44
3.5.13Conexión mediante acoplamiento de mallas. Fuente: propia.	45
3.6.1.Propuesta rediseño 1 en vista isométrica. Fuente: Propia.	46
3.6.2.Perfil tubular octagonal en vista isométrica. Fuente: Propia.	47
3.6.3.Operaciones de Perfil tubular octagonal. Fuente: Propia.	47
3.6.4.Sujetador de motor en vista isométrica. Fuente: Propia.	48
3.6.5.Operaciones en sujetador de motor. Fuente: Propia.	48
3.6.6.Sujetador de brazo en vista isométrica. Fuente: Propia.	49
3.6.7.Operaciones de sujetador de brazo. Fuente: Propia.	49
3.6.8.Perfil tubular octagonal en fibra de carbono utilizado para el rediseño del brazo del dron (RJX Hobby, 2025).	50
3.6.9.Propuesta de rediseño 2 en vista isométrica. Fuente: Propia.	50
3.6.10Rediseño del perfil tubular: a) boceto de la nueva sección transversal octagonal, b) modelo tridimensional del tubo en fibra de carbono. Fuente: Propia.	52
3.6.11Soporte de sujeción del motor en vista isométrica. Fuente: Propia.	53
3.6.12Sujetador del brazo en vista isométrica. Fuente: Propia.	53
3.7.1. <i>Brazo nuevo en vista isométrica con cargas.</i>	54
3.8.1.Piezas soporte de motor impresas en PLA. Elaboración propia	55
3.8.2.Vista de los parámetros de impresión configurados en Ultimaker Cura.	55
3.8.3.Brazo prototipo del dron ensamblado. Elaboración propia	56
4.2.1.Rotación nodal del brazo original bajo carga estática, elaboración propia	58
4.2.2.Concentración de esfuerzos de torsión en las superficies de las abrazaderas del brazo original, elaboración propia.	59
4.2.3.Rotación nodal del brazo modificado bajo carga estática, elaboración propia.	59
4.2.4.Concentración de esfuerzos de torsión en las superficies de las abrazaderas del brazo modificado, elaboración propia.	60
4.2.5.Desplazamientos nodales del brazo original, elaboración propia.	61
4.2.6.Desplazamientos nodales del brazo modificado, elaboración propia.	61
4.2.7.Distribución de esfuerzos de von Mises en el brazo original, elaboración propia	62
4.2.8.Distribución de esfuerzos de von Mises en el brazo modificado, elaboración propia	62

Índice de cuadros

3.1.1.Resumen del análisis del brazo y soporte de motor del dron Tarot 650. Elaboracion propia	27
4.1.1.Comparación de resultados FEA entre los dos diseños de brazo.	57

Capítulo 1

Introducción

El dron Tarot 650 es una plataforma versátil ampliamente utilizada en aplicaciones profesionales y de investigación. Sin embargo, presenta un problema crítico de giro en los brazos que compromete tanto la estabilidad como la precisión durante el vuelo. Este proyecto busca abordar dicho inconveniente mediante la implementación de soluciones técnicas que mejoren el rendimiento del dron y garanticen su comportamiento en vuelo.

Para resolver el problema de giro, se proponen dos soluciones clave:

La primera está relacionada con el rediseño estructural de los brazos mediante diseño generativo. Se plantea la creación de un nuevo diseño de los brazos del dron utilizando herramientas de diseño CAD a los cuales se les aplicará diseño generativo. Esta técnica permitirá optimizar la estructura, mejorando la distribución de material y la rigidez de los brazos para reducir la torsión sin agregar peso innecesario. acá se tiene un reto relacionado con la fabricación, para llevar este diseño a la realidad, se consideran varias opciones de fabricación:

Impresión 3D en metal o polímeros reforzados: Permitiría fabricar geometrías complejas y optimizadas directamente desde el modelo CAD. Materiales como el aluminio aeronautico o polímeros de alta resistencia como las poliamidas reforzadas con fibra de carbono que serían adecuados para mantener la ligereza y robustez.

Fresado CNC de 5 ejes: Aunque más limitado en cuanto a complejidad de formas, el fresado CNC ofrece gran precisión y podría usarse con materiales como aluminio o titanio, manteniendo la resistencia estructural con diseños simplificados derivados del proceso generativo.

Fundición a la cera perdida: Una opción viable para geometrías más complejas, permitiendo fabricar brazos con cavidades internas o estructuras optimizadas, ideales para un diseño generativo más avanzado.

El objetivo es obtener una estructura más eficiente y resistente que mantenga el balance entre ligereza y estabilidad, minimizando los efectos del giro no deseado.

La segunda propuesta incluye el rediseño de los soportes de sujeción y cambio en la geometría del brazo de fibra de carbono: Se propone sustituir los actuales brazos de sección circular por brazos con una sección poligonal, mejorando su resistencia a la torsión. Este cambio estructural será acompañado por el rediseño de los soportes de sujeción, los cuales estarán adaptados a la nueva geometría del brazo poligonal. El uso de fibra de carbono mantendrá la ligereza, mientras que la nueva sección ofrecerá mayor estabilidad estructural, permitiendo una sujeción más firme y precisa.

El desarrollo de estas soluciones comenzará con la búsqueda en internet del modelo que tiene la institución y de ser necesario se avanzará en la creación de un modelo CAD 3D del dron, incorporando los cambios propuestos. Posteriormente, se fabricará un prototipo funcional para validar las mejoras en vuelo, y se generarán los planos y la documentación técnica necesaria para la producción de las nuevas piezas. Finalmente, se elaborará un informe técnico detallando las modificaciones y su impacto positivo en el rendimiento del dron.



Figura 1.0.1: Tarot 650 propiedad de la IUPB. Fuente: propia

1.1. Planteamiento del problema

A pesar de que los drones comerciales han ganado protagonismo como herramienta innovadora en institutos técnicos y universidades de Colombia, su integración plena en proyectos de investigación enfrenta varios obstáculos. En particular, las dificultades para encontrar componentes específicos en el mercado se han convertido en un freno para el avance de diversas investigaciones realizadas por semilleros y grupos de estudio. Los investigadores se enfrentan a la carencia de piezas estandarizadas bajo normas técnicas de calidad como la ISO o UNE, lo que limita las opciones de adquisición de componentes prefabricados y funcionales para drones, otro factor importante es la obsolescencia de los equipos.

Las estructuras de soporte de los drones son críticas, pero conseguir las es casi imposible cuando los modelos quedan obsoletos. Esta ausencia de repuestos especializados obliga a los proyectos académicos a trabajar con piezas genéricas que no cumplen sus necesidades.

Los fabricantes priorizan componentes para drones de consumo masivo, dejando de lado soluciones específicas para investigación. Esto no solo dificulta conseguir materiales confiables, sino que también compromete la seguridad y el rendimiento del equipo.

Ante esta falta de opciones, investigadores y estudiantes terminan diseñando y fabricando soportes a la medida. Aunque viable, este camino exige conocimientos de ingeniería, dominio de software CAD y acceso a tecnologías de manufactura que no siempre están disponibles. Además, estas tareas consumen tiempo y recursos que deberían concentrarse en la investigación.

Esta situación frena el avance de muchos proyectos con drones: retrasa investigaciones, limita la experimentación con nuevas configuraciones y dificulta la formación de futuros profesionales en un campo clave para la industria. Sin componentes estandarizados, la innovación se estanca porque las soluciones deben diseñarse desde cero en lugar de mejorar sistemas existentes.

Ante este escenario, varios investigadores han recurrido a la impresión 3D, como analiza el artículo mencionado. Esta tecnología ofrece ventajas claras: menor peso, reducción de costos y tiempos de producción, además de permitir prototipos rápidos y iterativos. No obstante, también presenta límites importantes, como la menor capacidad de carga o la calidad superficial, factores que dependen del material empleado.

El texto destaca la importancia de elegir materiales como PLA, ABS o resinas estándar, cada uno con efectos distintos en el desempeño del dron. Además, resalta cómo la impresión 3D impulsa la creatividad y el aprendizaje práctico, tanto en entornos industriales como educativos. [Fernandez-](#)

Peña (2023)

En este contexto, es fundamental encontrar soluciones que permitan a los investigadores superar estas limitaciones, como la fabricación personalizada de piezas mediante tecnologías avanzadas (por ejemplo, impresión 3D y mecanizado CNC), y el desarrollo de componentes que puedan cumplir con las exigencias técnicas de los proyectos de investigación. Además, se hace evidente la necesidad de colaborar con la industria para fomentar la producción de piezas estandarizadas y certificadas bajo normas de calidad internacionales, lo que facilita el acceso a componentes esenciales y aceleraría los avances en la investigación y desarrollo de drones.

1.2. Justificación

Los UAV han demostrado ser increíblemente versátiles desde su aparición. Pueden detectar incendios, apoyar rescates o usarse en entretenimiento, y su capacidad para integrar distintos dispositivos los convierte en aliados ideales para tareas que superan las limitaciones humanas.

En el mercado actual, los drones comerciales se venden listos para usar, con componentes certificados y ensamblados. También es posible reemplazar o mejorar partes específicas —como cambiar un sensor de temperatura por uno más ligero o eficiente— gracias a la amplia oferta de repuestos. Sin embargo, esa disponibilidad no se extiende a todos los componentes: algunos problemas particulares de los drones no tienen soluciones comerciales, lo que deja vacíos importantes para quienes buscan adaptar o mejorar el equipo.

El presente proyecto aborda un problema recurrente en un dron comercial específico: el Tarot 650. Este modelo, almacenado en la institución universitaria Pascual Bravo, ha presentado fallas en uno de sus componentes críticos: el conjunto de brazos que sostiene los motores. Dicho componente, al no estar disponible comercialmente, ha obligado a los usuarios a fabricar sus propios reemplazos, los cuales, sin embargo, han demostrado ser igualmente defectuosos con el tiempo, repitiendo el problema de desajuste. Este desajuste genera un par de torsión indeseado hacia el suelo, lo que provoca que el dron pierda estabilidad y termine impactando contra el suelo, comprometiendo así no solo la integridad de los brazos, sino también la de otros componentes integrados.

La importancia de este proyecto radica en identificar las causas subyacentes de estas fallas y proponer una solución efectiva. A través de un rediseño del conjunto de brazos utilizando métodos avanzados de análisis mecánico, se busca desarrollar un prototipo que elimine el problema de torsión, mejorando la estabilidad y la seguridad del dron durante el vuelo. Esta iniciativa no solo

contribuirá al funcionamiento normal del Tarot 650, sino que también enriquecerá el estudio de elementos sometidos a esfuerzos normales y cortantes en sistemas mecánicos. Además, aportará al desarrollo del diseño mecánico de drones en general, así como al crecimiento del semillero de investigación de vehículos aéreos no tripulados en la sede Pilarica de la universidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Mejorar la estructura de soporte de los motores del dron Tarot 650 mediante el rediseño y validación de nuevos componentes haciendo uso de herramientas CAD y CAE, con el fin de mejorar la estabilidad y el rendimiento de vuelo, asegurando su funcionalidad y resistencia ante las condiciones operativas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar las deficiencias estructurales del dron tarot 650 mediante la evaluación de sus componentes actuales y la identificación de fallas mecánicas o de diseño que impidan su funcionamiento.

- Diseñar y modelar nuevos soportes para los motores utilizando software CAD, optimizando su geometría y materiales para mejorar la resistencia y eficiencia estructural del dron.

- Validar el rendimiento estructural de los componentes rediseñados mediante simulaciones CAE, asegurando su viabilidad mecánica y funcional antes de la fabricación e implementación en el dron.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Drones y su estructura:

Introducción a los sistemas UAV.

Los drones o vehículos aéreos no tripulados (UAVs) son aeronaves que pueden ser pilotadas de forma remota o volar de manera autónoma mediante el uso de sistemas de navegación en ruta programada o GPS. Entre sus principales características destaca la versatilidad para la que son diseñados, puesto que pueden cumplir diversas funciones, desde la vigilancia hasta la entrega de productos, y se utilizan en múltiples sectores, incluyendo el militar, agrícola, y de inspección industrial.

Entre los beneficios de los UAV se destaca su capacidad para llevar a cabo misiones complejas de manera más económica que las aeronaves convencionales. Esto ha impulsado su adopción en diversos campos, gracias a su tamaño compacto, su construcción eficiente y el uso de tecnología avanzada. [Pappalardo et al. \(2023\)](#)



Figura 2.1.1: Dron Típico. Fuente: HomeTechnology

2.2. Estructura del dron

2.2.1. Marco o chasis

Este componente es crucial ya que soporta y conecta todos los demás elementos del dron. En la Figura 2.2.1 se puede ver la estructura del dron Taror 650. Los materiales más comunes para el marco incluyen fibra de carbono, aluminio y plástico, debido a su ligereza y resistencia.

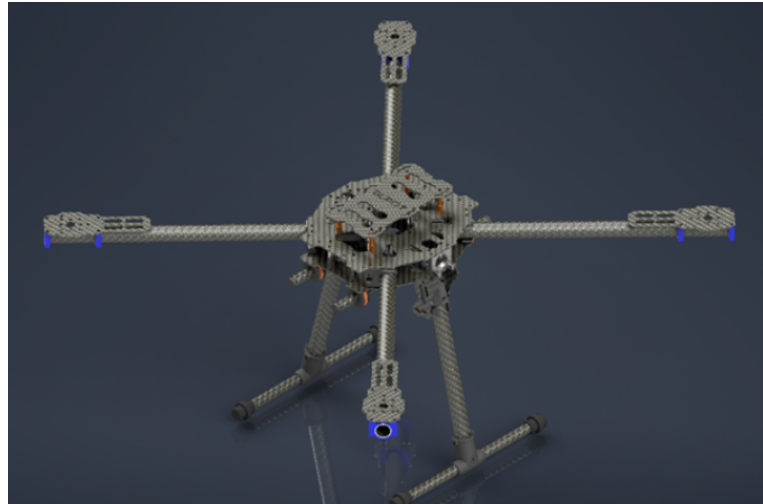


Figura 2.2.1: Marco o estructura del dron. (Fuente: Elaboracion propia)

Esta estructura, cuya selección es fundamental para soportar las condiciones físicas que se requerirán para su aplicación. Hace que el diseño pueda variar significativamente dependiendo del tipo de dron y su uso específico.

Los aspectos clave de su diseño incluyen:

Configuración de los brazos: Los drones pueden tener diferentes configuraciones de brazos (por ejemplo, cuadricópteros con cuatro brazos, hexacópteros con seis brazos). La configuración afecta la estabilidad y maniobrabilidad del dron.

Tamaño del marco: Determina el tamaño total del dron y su capacidad para soportar diferentes cargas útiles. Un marco más grande puede soportar baterías y motores más grandes, lo que puede aumentar la duración del vuelo y la capacidad de carga

Desempeño aerodinámico: Un buen diseño del marco puede mejorar la eficiencia aerodinámica del dron, reduciendo la resistencia al aire y mejorando la estabilidad en vuelo.

Protección de componentes: Protege los componentes internos, como la controladora de vuelo y la batería, de daños durante el vuelo y en caso de colisiones.

2.2.2. Materiales

La elección de materiales para la fabricación de drones es crucial, ya que influye directamente en su resistencia, peso, durabilidad y rendimiento durante el vuelo. Los materiales seleccionados deben lograr un equilibrio entre ligereza y la capacidad de soportar cargas y resistir vibraciones, aspectos esenciales para drones que necesitan alta eficiencia energética y estabilidad. A continuación, se detallan algunos de los materiales más comunes en la fabricación de drones:

2.2.2.1. Fibra de carbono:

La fibra de carbono, también conocida como fibra de grafito es un polímero compuesto por filamentos muy finos, de entre 5mm y 10mm de diámetro. Los átomos de carbono están unidos entre sí formando cristales microscópicos que se encuentran alineados en paralelo a lo largo del eje de la fibra, la cual le otorga propiedades mecánicas excepcionales, como lo es, la alta resistencia a la tracción. En la Figura 2.2.2 se ve el entramado de la fibra de carbono.

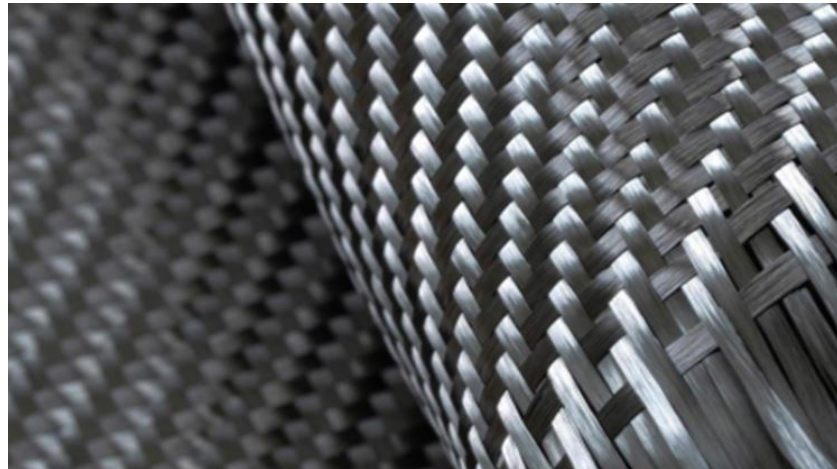


Figura 2.2.2: Fibras de carbono, fuente: Xataka

Las propiedades mecánicas más destacables son:

- Alta resistencia mecánica.
- Módulo de elasticidad de aproximadamente $40,000 \text{ N/mm}^2$, en el tipo de fibra de uso más habitual.
- Coeficiente de Poisson de alrededor de 0,30.
- Posee conductividad eléctrica.
- Baja conductividad térmica.

- Relativamente baja densidad, de unos $1,750 \text{ kg/m}^3$.
- Buena resistencia al medio ambiente.
- Resistente a la expansión térmica.
- Flexibilidad elevada.

Sus aplicaciones comenzaron para la industria aeroespacial, pero con el paso del tiempo se empezaron a utilizar en el automovilismo, en automóviles de competición como en la Fórmula 1, y hoy en día se utiliza para fabricar cualquier cosa, hasta por fines estéticos.

2.2.2.2. Aleación de Aluminio 6061:

El aluminio es otro material común, especialmente en drones de mayor tamaño o en aquellos donde el costo es una preocupación importante. Este material combina una ligereza razonable con una buena resistencia estructural y facilidad para mecanizarse.

El aluminio tiene buena resistencia a la corrosión y es relativamente fácil de fabricar en comparación con otros materiales. También permite la disipación de calor, lo cual es útil para los componentes cercanos a los motores y la electrónica. Sin embargo, aunque es más barato y más resistente a impactos que la fibra de carbono, el aluminio es más pesado, lo cual puede afectar la eficiencia energética del dron y reducir su tiempo de vuelo.

Las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061 son:

- Resistencia a la tracción: 290 MPa (T6) y 124 MPa (O).
- Límite elástico: 241 MPa (T6) y 55 MPa (O).
- Módulo de elasticidad: 68,9 GPa.
- Coeficiente de Poisson: 0,33.
- Densidad: $2,70 \text{ g/cm}^3$.
- Dureza Brinell: 95 (T6).
- Alargamiento a la rotura: 12 % (O) y 8 % (T6).
- Conductividad térmica: $167 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.
- Resistencia a la fatiga: 96,5 MPa (a 5×10^8 ciclos, en T6).

2.2.2.3. Polímeros de ingeniería (PA66 “Nylon”, ABS, UHMWPE):

Los polímeros como el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), el PA66 (Poliamida 66 o Nylon) y el UHMWPE (Polietileno de alto peso molecular) se utilizan ampliamente en la fabricación de drones, sobre todo en aplicaciones de impresión 3D. Son materiales versátiles y de bajo costo, ideales para la creación rápida de prototipos y piezas estructurales y no estructurales.

Estos polímeros son económicos, ligeros y tienen buena resistencia al desgaste. Además, el uso de impresión 3D con estos materiales permite personalizar diseños con facilidad y reducir costos en la fase de prototipado.

La resistencia estructural de estos materiales es menor en comparación con la fibra de carbono o el aluminio, por lo que suelen usarse para carcasas o componentes secundarios que no requieren soportar grandes cargas.

Las propiedades mecánicas del ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) son:

- Resistencia a la tracción: 40 MPa.
- Módulo de elasticidad: 2,0 - 2,5 GPa.
- Resistencia al impacto (Izod, muesca a 23°C): 15 - 30 kJ/m².
- Dureza Rockwell: 100 (escala R).
- Alargamiento a la rotura: 10 - 50 %.
- Coeficiente de Poisson: 0,35.
- Densidad: 1,04 g/cm³.
- Temperatura de deflexión térmica: 95 - 105 °C (a 0,45 MPa).
- Baja conductividad térmica: 0,17 W/m·K.

Las propiedades mecánicas de la Poliamida 66 (PA66) son:

- Resistencia a la tracción: 70 - 85 MPa.
- Módulo de elasticidad: 2,5 - 3,2 GPa.
- Resistencia al impacto (Izod, muesca a 23°C): 5 - 15 kJ/m².
- Dureza Rockwell: 120 (escala R).
- Alargamiento a la rotura: 20 - 80 %.

- Coeficiente de Poisson: 0,4.
- Densidad: 1,13 - 1,15 g/cm³.
- Temperatura de deflexión térmica: 75 - 80 °C (a 1,8 MPa).
- Baja conductividad térmica: 0,25 W/m·K.

Al seleccionar materiales para drones, los ingenieros deben equilibrar la necesidad de resistencia con la reducción de peso para maximizar la eficiencia de vuelo y la durabilidad del dron. La selección del material también dependerá del tipo de dron y de su aplicación específica (recreativa, industrial, de investigación, etc.). En algunos casos, se utilizan combinaciones de estos materiales para optimizar el diseño, como brazos de fibra de carbono con refuerzos de aluminio o magnesio en áreas críticas, logrando así un dron que cumpla con los requisitos funcionales y estructurales necesarios para su operación.

2.2.3. Motores

Los motores son componentes esenciales en los drones, responsables de generar la fuerza de propulsión que permite el vuelo. Los motores de drones generalmente son motores eléctricos, que ofrecen una respuesta rápida, eficiencia y control preciso. La elección del motor depende de factores como el tamaño del dron, el tipo de carga que transportará, el tiempo de vuelo requerido y la maniobrabilidad.

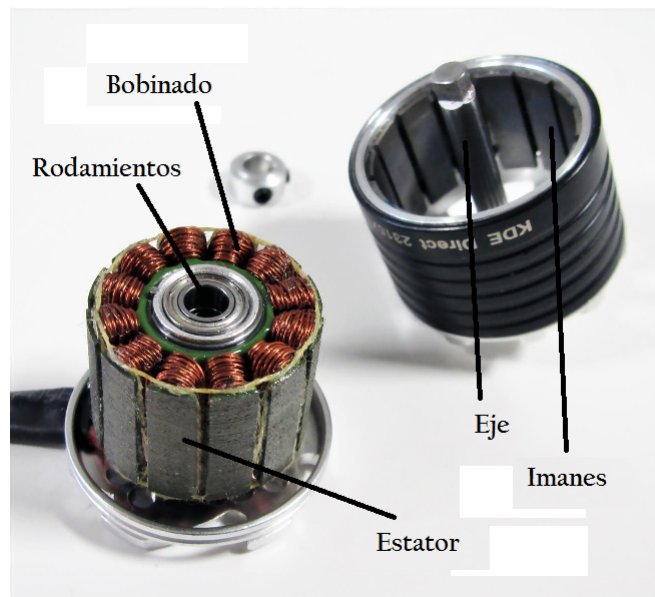


Figura 2.2.3: Esquema básico de un motor de un dron

A continuación, se describen los tipos y características clave de los motores utilizados en drones:

2.2.3.1. Motores sin Escobillas (Brushless):

Los motores sin escobillas, también conocidos como "brushless", son el estándar en drones modernos, especialmente en drones de tamaño mediano y grande, debido a su eficiencia y durabilidad. Estos motores funcionan sin contacto directo entre el rotor y el estator, eliminando el desgaste que sufren otros tipos de motores eléctricos. En la Figura 2.2.3, se puede ver el motor brushless.

Un motor brushless funciona mediante la rotación de un campo magnético generado en el estator, alrededor de un rotor que contiene imanes permanentes. A diferencia de los motores con escobillas, donde el contacto entre las escobillas y el conmutador crea fricción, el motor brushless elimina esta fricción al no requerir contacto directo, lo que permite que el motor opere de manera más suave y eficiente. En un motor brushless, un controlador de velocidad electrónico (ESC, Electronic Speed Controller) se encarga de dirigir la corriente en el estator, generando campos magnéticos secuenciales que giran el rotor. Según XXX, los motores brushless destacan en aplicaciones de robótica y aeronáutica debido a su capacidad para controlar con precisión las revoluciones y proporcionar un empuje eficiente. Esto es fundamental en aplicaciones como los drones, donde la estabilidad y la eficiencia en el consumo de energía son primordiales, XXXX subrayan que la respuesta rápida de los motores brushless es clave para maniobras en drones de carreras y para estabilización en drones de filmación .

Eficiencia Energética y Larga Vida Útil Los motores brushless son más eficientes energéticamente que los motores con escobillas, ya que eliminan las pérdidas de energía causadas por la fricción de las escobillas. Esto permite que los drones obtengan tiempos de vuelo más prolongados y una mayor vida útil del motor, elementos críticos en drones comerciales y de uso intensivo.

Tamaño del Motor Los motores brushless se basan en las dimensiones del estator, generalmente en milímetros (por ejemplo, "2205", que significa 22 mm de diámetro y 5 mm de altura). Un tamaño mayor en el motor permite un torque superior y, por tanto, un mejor manejo de drones más pesados o con mayor carga.

2.2.3.2. Motores con Escobillas (Brushed):

Estos motores funcionan con escobillas que transfieren la corriente al rotor. Aunque su uso en drones es limitado, pueden encontrarse en drones pequeños o de nivel principiante debido a su bajo costo y simplicidad de uso. Estos motores son económicos, fáciles de reemplazar y no

requieren controladores electrónicos complejos, lo que simplifica el diseño del dron. Sin embargo, su vida útil es corta debido al desgaste de las escobillas, y son menos eficientes que los motores sin escobillas. También generan más calor, lo cual puede afectar la durabilidad y el rendimiento del dron en vuelos largos.

2.2.3.3. Características Clave de los Motores para Drones:

- **KV Rating:** Esta es una medida de la velocidad del motor en relación con el voltaje. Un motor de "1000 KV" significa que el motor girará a 1000 RPM por cada voltio aplicado sin carga. Los drones de carreras generalmente utilizan motores de alto KV para alcanzar mayores velocidades, mientras que los drones de carga o de estabilidad (como los de filmación) prefieren motores de bajo KV, que ofrecen más torque.
- **Torque:** El torque es crucial para levantar peso, especialmente en drones que transportan cámaras o sensores. Motores con mayor torque son preferibles en drones de carga o en aquellos que requieren un control más estable a bajas velocidades.
- **Tamaño:** Los motores para drones varían en tamaño (designado generalmente por números como "2212" o "2306", que indican el diámetro y la altura del estator en milímetros). Los motores más grandes proporcionan más potencia y están diseñados para drones que requieren una gran capacidad de elevación.
- **Controladores de Velocidad Electrónica (ESC):** Los motores sin escobillas requieren ESC para controlar su velocidad de rotación y su potencia. Los ESC gestionan la cantidad de energía que va al motor y permiten cambios rápidos en la velocidad, fundamentales para el control preciso y la estabilidad en vuelo.
- **Refrigeración:** Los motores de drones suelen calentarse con el uso intensivo. Algunos motores cuentan con sistemas de ventilación integrados o diseños de carcasa que permiten una mejor disipación de calor, especialmente en drones de carreras o de uso industrial.

La selección de los motores adecuados depende de factores como el tipo de dron (carrera, carga, filmación o recreativo), el peso total del dron, el tipo de batería y las condiciones de vuelo esperadas. Los motores sin escobillas dominan en drones modernos, especialmente en aplicaciones donde la eficiencia, la durabilidad y el control son prioridades. Sin embargo, los motores de escobillas siguen siendo útiles en drones de bajo costo o en aplicaciones educativas debido a su simplicidad y bajo precio.

2.2.4. Hélices

Las hélices de los drones son componentes esenciales para el control de vuelo y la estabilidad del dispositivo en el aire. En la Figura 2.2.4 se ven diferentes tipos de hélices. Su función principal es generar el empuje necesario para levantar el dron, contrarrestar la gravedad y proporcionar el control de dirección. Las hélices están diseñadas para aprovechar la fuerza de rotación de los motores y convertirla en fuerza de elevación y desplazamiento mediante un flujo de aire. En un dron de tipo cuadricóptero, las hélices suelen trabajar en pares opuestos: mientras dos giran en sentido horario (CW), las otras dos giran en sentido antihorario (CCW) para equilibrar el torque y evitar que el dron gire sobre su propio eje.



Figura 2.2.4: Tipos de hélices

2.2.4.1. Tipos de Hélices para Drones:

- **Hélices de Dos Palas:** Son las más comunes y consisten en dos palas opuestas unidas al centro de la hélice. Tienen una estructura simple y suelen ser más eficientes energéticamente, ofreciendo un buen balance entre velocidad y estabilidad, lo que las hace ideales para drones recreativos y de uso general.
- **Hélices de Tres o Más Palas:** Estas hélices ofrecen un mayor control y estabilidad, especialmente a altas velocidades. Al tener más palas, generan más empuje, lo cual es beneficioso en drones de carreras y aquellos que necesitan mayor maniobrabilidad. Sin embargo, consumen más energía que las hélices de dos palas, lo que reduce la duración de la batería.
- **Hélices Dobles (CW y CCW):** En los drones, se usan hélices con orientación en ambos sentidos de giro. Las hélices CW giran en el sentido de las agujas del reloj y las CCW en sentido contrario. La combinación permite estabilizar el dron y facilita su control de rotación, inclinación y elevación.

2.2.6. Placa controladora de vuelo

Es un componente electrónico, en forma de placa que integra el dron ensamblado en su chasis, y se encarga de gestionar las instrucciones de vuelo enviadas desde el controlador del piloto, dirigiéndose a los motores del dron. En otras palabras, se puede considerar como el cerebro del dron. Además de esta función principal, la placa controladora de vuelo puede incluir otros dispositivos como giroscopio, acelerómetro, magnetómetro e incluso GPS así como otros instrumentos electrónicos que sean útiles para el funcionamiento del dron



Figura 2.2.6: Placa controladora de vuelo

2.2.7. Cámara

Las cámaras en los drones son dispositivos esenciales para capturar imágenes y videos desde una perspectiva aérea. Estas cámaras han transformado el uso de los drones, permitiéndoles realizar tareas en áreas como fotografía profesional, inspección industrial, agricultura, seguridad y mapeo topográfico. La calidad, resolución y características específicas de las cámaras varían según el propósito del dron, desde cámaras simples para uso recreativo hasta sistemas avanzados de alta resolución para trabajos profesionales.

2.2.7.1. Tipos de Cámaras en Drones:

- **Cámaras FPV (First Person View):** Estas cámaras están diseñadas para brindar una vista en tiempo real desde el dron al operador, generalmente a través de un dispositivo como un monitor, teléfono móvil o gafas FPV. Las cámaras FPV suelen tener un campo de visión amplio para facilitar el control del dron y permiten una conexión de baja latencia. Aunque su resolución suele ser menor en comparación con las cámaras de captura, ofrecen

un flujo de video fluido y continuo.

- **Cámaras de Alta Resolución:** Estas cámaras están diseñadas para capturar imágenes y videos de alta calidad. La mayoría de los drones de uso profesional o de fotografía aérea vienen con cámaras de resolución de 4K o superior. Son ideales para tareas de inspección, filmación y mapeo donde se necesita un gran nivel de detalle.
- **Cámaras Térmicas e Infrarrojas:** Las cámaras térmicas detectan la radiación infrarroja y generan una imagen basada en las diferencias de temperatura. Estas cámaras son útiles en aplicaciones de inspección industrial, rescate, agricultura y seguridad, donde se necesita detectar cambios de temperatura en objetos o áreas específicas.
- **Cámaras Multiespectrales:** Son cámaras que capturan imágenes en varias longitudes de onda (más allá de lo visible), permitiendo realizar análisis avanzados de vegetación, suelos y agua. Estas cámaras se utilizan principalmente en la agricultura de precisión y en estudios ambientales para monitorear el estado de salud de los cultivos y los recursos naturales.

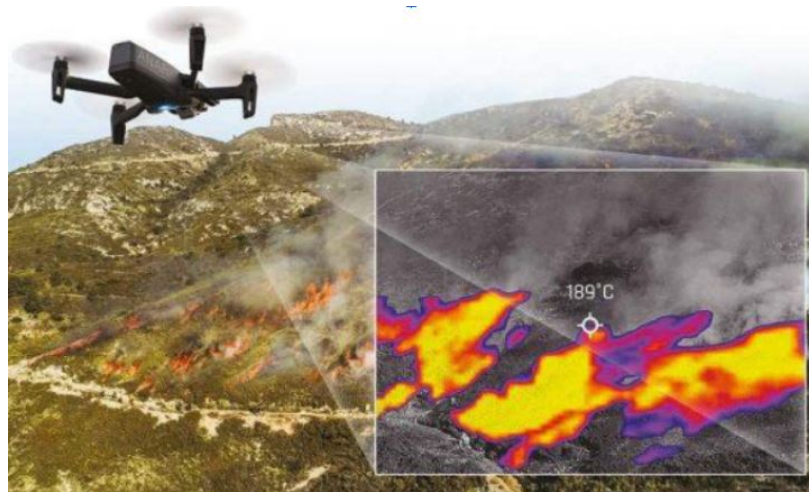


Figura 2.2.7: Camara de reconocimiento termico

2.2.8. Análisis de Elementos Finitos (FEA)

El Análisis de Elementos Finitos (FEA, por sus siglas en inglés) es un método numérico ampliamente utilizado en ingeniería para predecir el comportamiento estructural y funcional de los materiales y sistemas sometidos a diversas condiciones de carga. Su desarrollo teórico se remonta a principios del siglo XX y ha evolucionado significativamente con el avance de la computación [Zienkiewicz and Taylor \(2000\)](#). Actualmente, empresas líderes en distintas industrias, como Boeing, Ford, General Electric, Intel e IBM, emplean software de simulación

basado en FEA para optimizar sus procesos de diseño y manufactura Logan (2011). El FEA permite dividir la geometría de un objeto en una malla de elementos finitos interconectados a través de nodos, facilitando así la solución de ecuaciones diferenciales parciales que describen su comportamiento físico Cook et al. (2001). Esta técnica es fundamental en la ingeniería mecánica, aeroespacial, biomédica, civil y eléctrica, ya que permite evaluar el desempeño de un diseño antes de su fabricación. El proceso de análisis comienza con la discretización del modelo en una malla compuesta por pequeños elementos finitos. Luego, se definen las condiciones de contorno y las cargas aplicadas. A partir de estos datos, el software de análisis resuelve las ecuaciones que gobiernan el sistema, obteniendo resultados que permiten evaluar su rendimiento y fiabilidad. Entre las principales aplicaciones del FEA se encuentran el análisis de esfuerzos mecánicos, vibraciones, fatiga, transferencia de calor, flujo de fluidos, electrostática y procesos de manufactura como el moldeo por inyección de plástico Bathe (2006). El análisis de tensiones realizado con FEA también permite calcular el factor de seguridad, un parámetro clave para determinar la resistencia de un diseño ante posibles fallos estructurales. Gracias a su capacidad para simular diversos fenómenos físicos, el FEA se ha consolidado como una herramienta indispensable en la ingeniería moderna, mejorando la precisión del diseño y reduciendo costos de prueba y fabricación Reddy (2019). En la Figura 2.2.8 podemos ver un ejemplo de un análisis estado estático lineal.

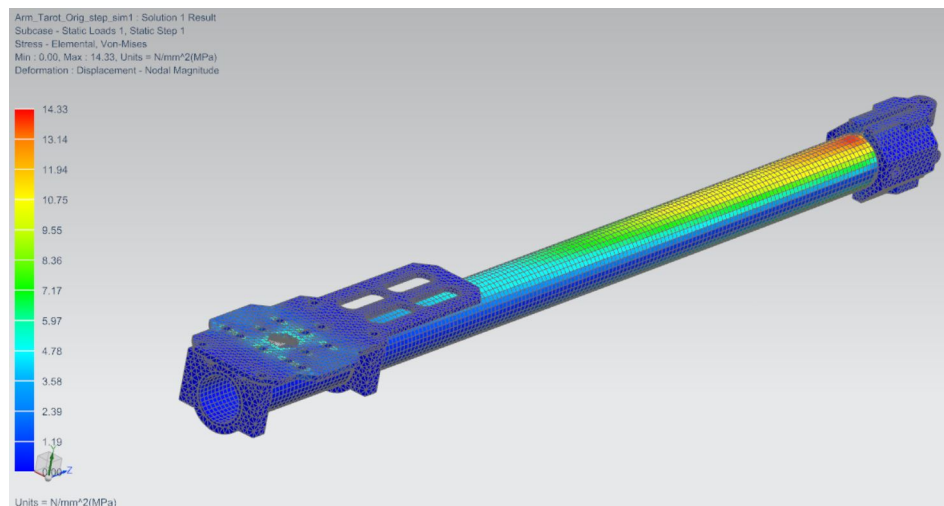


Figura 2.2.8: Análisis estático lineal. (Fuente: Elaboración propia)

2.2.8.1. Análisis Estático

¿En qué consiste?

El análisis estático es un procedimiento en ingeniería estructural que permite evaluar la respuesta

de una estructura sometida a cargas y momentos sin considerar los efectos del tiempo. A través de este análisis, se pueden determinar desplazamientos, deformaciones, tensiones y fuerzas internas, asegurando que la estructura sea capaz de soportar las cargas previstas sin fallar [Beer et al. \(2012\)](#).

En el diseño de un dron, el análisis estático es fundamental para verificar la resistencia de los componentes estructurales, como los brazos del dron, asegurando que soporten las cargas generadas durante el vuelo, maniobras y aterrizaje sin sufrir deformaciones o fracturas. Para obtener datos críticos y evaluar mejoras en el diseño, es necesario realizar el análisis a las estructuras. El estudio realizado por [Urdea \(2021\)](#) se enfoca en el análisis estructural y de vibraciones de un dron mediante simulaciones en SolidWorks, con el objetivo de evaluar su resistencia y comportamiento bajo diferentes condiciones de carga. Para el análisis estático, se consideraron fuerzas como el peso de los componentes y la tracción generada por los motores, aplicando restricciones que simulan el anclaje del marco. Los resultados obtenidos a través del método de elementos finitos (FEA) permitieron identificar las zonas más críticas en términos de esfuerzo y deformación, destacando que la mayor concentración de tensiones ocurre en el centro del dron. Estos hallazgos proporcionan información clave para optimizar el diseño y mejorar la resistencia estructural del dispositivo antes de someterlo a análisis dinámicos más avanzados.

2.2.8.2. Características Claves en un Análisis Estático

Para garantizar un buen análisis estático, es importante considerar los siguientes aspectos:

- **Tipo de Materiales:** Conocer las propiedades mecánicas del material, como el módulo de elasticidad, el límite elástico y el coeficiente de Poisson, permite predecir su comportamiento ante cargas aplicadas [Callister and Rethwisch \(2020\)](#).

Cargas Aplicadas: Definir correctamente las fuerzas que actúan sobre la estructura, considerando su magnitud, dirección y punto de aplicación. Estas cargas pueden ser axiales, cortantes, de flexión, torsión o una combinación de ellas [Beer et al. \(2012\)](#).

Condiciones de frontera: Establecer correctamente los apoyos y restricciones de la estructura, ya que estos afectan la forma en que reacciona ante las cargas. Entre las condiciones más comunes se incluyen apoyos fijos, empotramientos y restricciones deslizantes [Gómez González \(2016\)](#).

Geometría de la Estructura: La forma y dimensiones de la estructura influyen significativamente en su respuesta a las cargas. Un modelado preciso mediante herramientas

CAD (Diseño Asistido por Computadora) es esencial para obtener resultados realistas [Gómez González \(2016\)](#).

Método de Análisis: Se debe seleccionar un método adecuado para resolver el problema, como el método de los elementos finitos (FEM), que divide la estructura en pequeñas regiones interconectadas y permite resolver numéricamente las ecuaciones de equilibrio [Cook et al. \(2001\)](#).

Factor de Seguridad: Incorporar un margen de seguridad en el diseño permite garantizar que la estructura soporte cargas superiores a las previstas, reduciendo el riesgo de fallo estructural [Beer et al. \(2012\)](#).

2.2.9. Software CAD/CAE

El diseño asistido por computadora (CAD), y la ingeniería asistida por computadora (CAE) son tecnologías esenciales en el desarrollo de productos en múltiples industrias. A continuación, se presentan algunos software utilizados en estos campos: SolidWorks, Autodesk Fusion 360 y Siemens NX, cada uno con características y ventajas particulares.

2.2.9.1. SolidWorks

SolidWorks es un software líder en diseño CAD 3D, ampliamente utilizado en sectores como la automoción, aeroespacial, manufactura y productos de consumo. Se destaca por su enfoque en la productividad y facilidad de uso, permitiendo a diseñadores e ingenieros crear y validar modelos con alta precisión. [Systèmes \(2024\)](#)

Características principales de SolidWorks

- **Modelado paramétrico y diseño 3D:** Permite la creación de piezas y ensamblajes complejos con relaciones paramétricas que facilitan la edición y optimización del diseño.
- **Simulación y análisis:** Su módulo *SolidWorks Simulation* permite realizar estudios de esfuerzos, transferencia de calor y dinámica de fluidos para evaluar el rendimiento de los productos antes de la fabricación.
- **Gestión de datos:** A través de *SolidWorks PDM*, facilita la organización y control de versiones de archivos de diseño, optimizando el flujo de trabajo colaborativo.

2.2.9.2. Autodesk Fusion 360

Autodesk Fusion 360 es una solución integral basada en la nube que combina CAD, CAE, CAM y diseño de circuitos impresos (PCB), proporcionando un entorno colaborativo en tiempo real. Su flexibilidad lo hace ideal para ingenieros, diseñadores y fabricantes que buscan optimizar sus flujos de trabajo. [Autodesk \(2024\)](#)

Características principales de Fusion 360

- **Modelado 3D versátil:** Soporta modelado paramétrico, directo y basado en mallas, permitiendo la creación de superficies complejas y geometrías precisas.
- **Simulación y análisis:** Incorpora herramientas avanzadas para análisis de esfuerzos, simulación térmica y diseño generativo, optimizando la resistencia y eficiencia del producto antes de la fabricación.
- **Fabricación avanzada:** Soporta programación CNC (fresado de 2.5 a 5 ejes), impresión 3D, corte láser y fabricación en chapa, asegurando precisión en la manufactura.
- **Colaboración en la nube:** Permite que equipos de diferentes ubicaciones trabajen simultáneamente en un mismo proyecto, con gestión centralizada de datos y control de versiones.
- **Integración de diseño electrónico:** *Fusion 360* permite el desarrollo de circuitos impresos (PCB), esquemáticos y simulaciones electrónicas, mejorando la integración con el diseño mecánico.
- **Diseño generativo:** Utiliza inteligencia artificial para explorar múltiples configuraciones y optimizar diseños según restricciones de material, costo y manufactura.

2.2.9.3. Siemens NX

Siemens NX es un software de ingeniería avanzada que integra CAD, CAE y CAM en una única plataforma, ofreciendo herramientas de modelado, simulación y manufactura de alto rendimiento. Es ampliamente utilizado en sectores como la automoción, aeroespacial y manufactura avanzada, donde se requiere precisión y eficiencia en el desarrollo de productos. [Siemens \(2024\)](#)

Características principales de Siemens NX

- **Modelado avanzado:** NX permite el modelado paramétrico, directo y basado en superficies, facilitando el diseño de productos altamente complejos con herramientas de

automatización.

- **Simulación y análisis estructural:** Incorpora herramientas de análisis de elementos finitos (FEA), análisis de fatiga, optimización topológica y simulación térmica para mejorar la resistencia y durabilidad del diseño.
- **Manufactura asistida por computadora (CAM):** Soporta la programación de máquinas CNC de 2 a 5 ejes, mecanizado adaptativo, electroerosión y manufactura aditiva, optimizando los procesos de producción.
- **Diseño generativo y optimización topológica:** Utiliza inteligencia artificial y algoritmos avanzados para optimizar la geometría de las piezas según criterios de carga y material.
- **Gestión del ciclo de vida del producto (PLM):** *Siemens NX* se integra con *Teamcenter*, permitiendo la gestión eficiente de datos, revisiones y flujos de trabajo en toda la empresa.
- **Interoperabilidad y automatización:** Admite integración con otros software de ingeniería y manufactura, además de permitir la automatización de tareas mediante programación personalizada.

2.2.9.4. ANSYS

ANSYS es un software líder en ingeniería asistida por computadora (CAE) especializado en simulación y análisis de elementos finitos (FEA), dinámica de fluidos computacional (CFD), electromagnetismo y análisis multifísico. Es ampliamente utilizado en industrias como la aeroespacial, automotriz, manufactura, energía y electrónica, permitiendo validar diseños antes de su fabricación para optimizar rendimiento, resistencia y eficiencia. [Ansys \(2024\)](#)

Características principales de ANSYS

- **Análisis estructural avanzado:** Permite realizar estudios de tensiones, deformaciones, fatiga y vibraciones en estructuras mecánicas bajo diversas condiciones de carga.
- **Simulación de dinámica de fluidos (CFD):** Con herramientas como *ANSYS Fluent* y *ANSYS CFX*, permite el análisis de aerodinámica, transferencia de calor y flujos de fluidos en entornos complejos.
- **Electromagnetismo y análisis térmico:** Facilita el diseño y validación de dispositivos

electrónicos, motores eléctricos y sistemas térmicos mediante simulaciones precisas.

- **Optimización topológica y diseño generativo:** Integra herramientas de optimización para reducir peso, mejorar la distribución de material y optimizar el desempeño estructural.
- **Simulación multifísica:** Permite combinar diferentes disciplinas (estructuras, fluidos, térmica y electromagnetismo) para predecir el comportamiento real del producto en entornos complejos.
- **Integración con CAD y automatización:** Se complementa con software CAD como *SolidWorks*, *NX* y *Fusion 360*, permitiendo importar modelos 3D para su análisis directo y automatizar procesos mediante programación en *Python* o *APDL*.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Análisis del Diseño Actual

Para determinar el estado del brazo y soporte de motor del dron Tarot 650, se realizó un análisis físico, dimensional y de materiales en el laboratorio del bloque 5 de la Institución Universitaria Pascual Bravo. El proceso se dividió en tres fases:

1. Inspección física y dimensional

- Se tomaron las dimensiones generales de los brazos y soportes de motor (ver Figura 3.1.1, Figura 3.1.2, Figura 3.1.5).
- Se identificó la geometría principal: brazos cilíndricos (ejes redondos), uniones en ABS y soportes de motor acoplados por tornillos.
- Se documentó el estado actual mediante fotografías y esquemas.

2. Evaluación de materiales

- **Abrazaderas:** fabricadas en ABS. Su función es restringir el movimiento de cables, reducir vibraciones del motor y aumentar la estabilidad.
- **Uniones al centro del dron:** fabricadas en ABS. Fijan los brazos al cuerpo central, evitando deslizamiento debido a la geometría cilíndrica.
- **Brazo soporte de motor:** fabricado en ABS de color rojo oscuro. Sujeta el motor mediante tornillos, sostiene el cableado y se acopla firmemente al brazo principal.
- Se evidenció que la elección del ABS, si bien facilita la fabricación rápida, puede



Figura 3.1.1: Vista superior del motor y hélice con medidas principales. (Fuente: Elaboración propia)

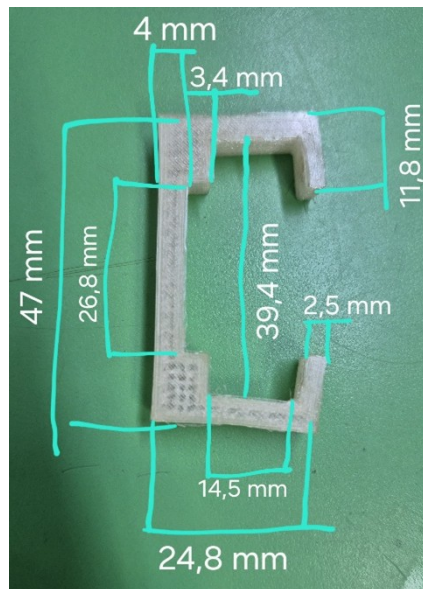


Figura 3.1.2: Abrazadera en ABS con dimensiones generales. (Fuente: Elaboración propia)

limitar la resistencia mecánica y la durabilidad bajo cargas dinámicas.

3. Análisis del ensamblaje

- Los soportes de motor están unidos por tornillos de fijación al brazo, asegurando la sujeción de motor y cableado.



Figura 3.1.3: Soporte del motor con abrazadera de sujeción de cables. (Fuente: Elaboración propia)

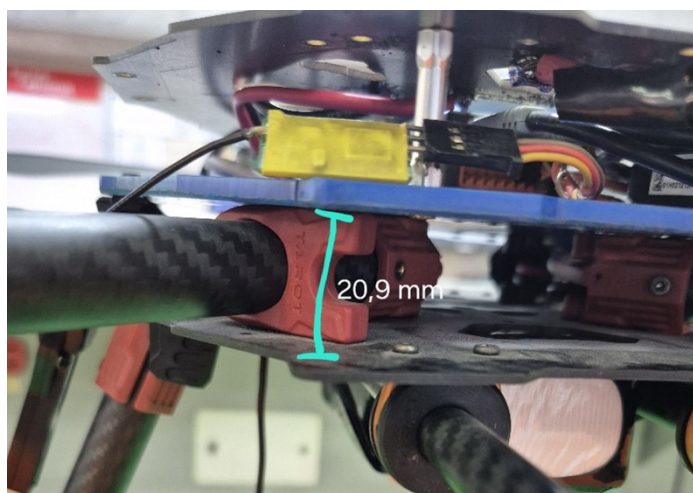


Figura 3.1.4: Unión del brazo al cuerpo central del dron (impreso en ABS). (Fuente: Elaboración propia)

- Se detectó que los brazos cilíndricos tienden a deslizarse, lo que implica la necesidad de reforzar el sistema de unión.
- Las abrazaderas en ABS, aunque funcionales para reducir vibraciones, representan un posible punto crítico de desgaste por fricción, además los materiales poliméricos tienen a la fluencia en frío.

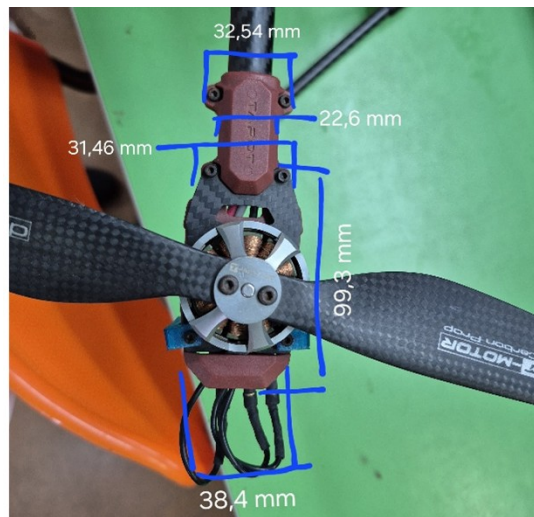


Figura 3.1.5: Vista superior del soporte de motor con medidas detalladas. (Fuente: Elaboración propia)

3.1.0.1. Resumen en tabla

Componente	Material	Función	Observaciones
Abrazadera	ABS (impresión 3D)	Restringir movimiento de cables, reducir vibraciones	Posible desgaste por fricción en el material
Uniones al centro	ABS (impresión 3D)	Fijar brazos al cuerpo central, evitar deslizamiento	Brazos cilíndricos tienden a deslizarse
Brazo soporte de motor	ABS (rojo oscuro)	Sujetar motor, sostener cableado y acoplarse firmemente	Limitaciones en resistencia mecánica y durabilidad

Cuadro 3.1.1: Resumen del análisis del brazo y soporte de motor del dron Tarot 650. Elaboración propia

3.2. Análisis por Elementos Finitos (CAE)

Análisis y modelado del brazo y soporte de motor de un dron:

- Modelo 3D CAD del Brazo y Soporte:** Se elaboró un modelo conservando el concepto del brazo original del dron Tarot 650, este modelo permitió conocer las dimensiones prácticas destacando los puntos de sujeción, asegurando que cualquier rediseño posterior

fuera completamente compatible con el chasis y demás componentes. La fidelidad al diseño original sirvió como referencia para evaluar mejoras estructurales y de ensamblaje. Se trabajó así mismo, en prototipos elaborados tanto en SolidWorks, como en NX, tratando así de encontrar una solución real a los problemas como: vibraciones, piezas con desajustes o mal sujetas, elongación y torsión de estas.

3.2.1. Modelo 3D del brazo original

El modelo 3D del brazo original se elaboró en *SolidWorks*, respetando las medidas que conectan los soportes con el chasis y el diámetro del perfil tubular. Este modelo sirvió como plantilla para las modificaciones futuras y permitió simular condiciones de esfuerzo y estática sin necesidad de alterar la pieza física.

Es importante mencionar que los cuatro perfiles estructurales que funcionan como brazos son uniformes entre sí; es decir, todos presentan la misma forma y estructura.

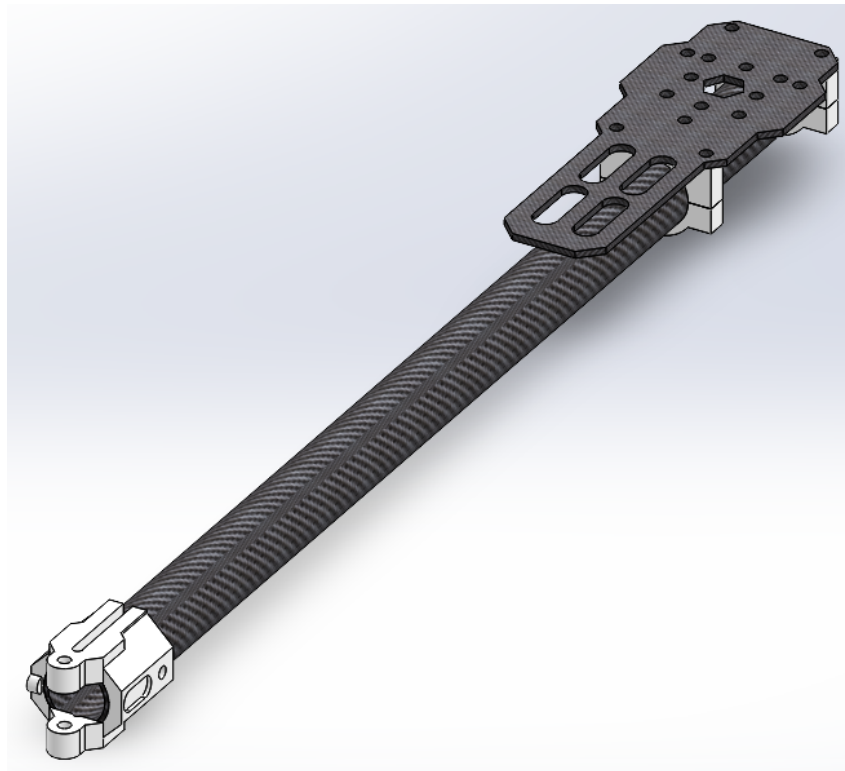


Figura 3.2.1: Modelo idéntico en vista isométrica. Fuente: Propia.

3.2.2. Piezas que componen el brazo

Las piezas que conforman el brazo se diseñaron siguiendo las especificaciones del manual del fabricante *TAROT*, elaborando cada una de manera individual y preparándolas para el primer

análisis estático de esfuerzos. A cada componente se le asignó el material correspondiente.

La lista de componentes es la siguiente:

- Soporte de fijación del brazo al dron.
- Perfil tubular redondo.
- Platina de fijación del motor.
- Abrazaderas de la platina al tubo.

3.2.2.1. Soporte de fijación del brazo al dron

El soporte, fabricado en **ABS**, se diseñó respetando las dimensiones y especificaciones requeridas. Incluye las perforaciones y tolerancias necesarias para garantizar un ensamble adecuado, y fue modelado tomando como referencia los elementos encontrados en el laboratorio.

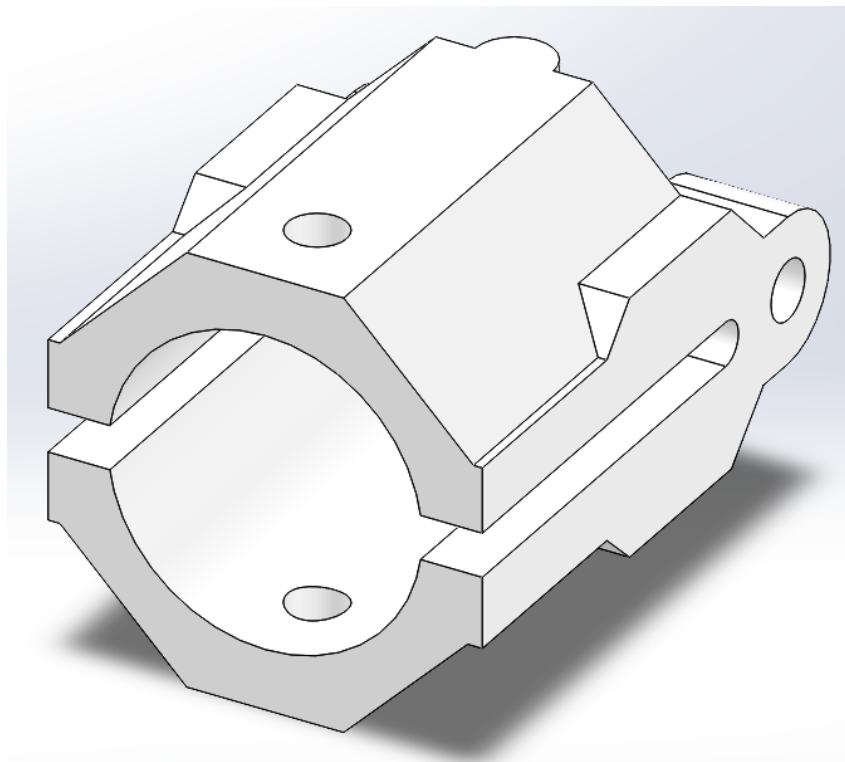


Figura 3.2.2: Soporte de fijación en vista isométrica. Fuente: Propia.

3.2.2.2. Operaciones requeridas

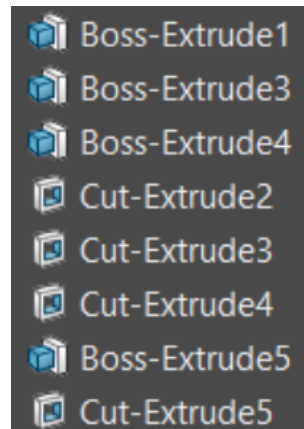


Figura 3.2.3: Soporte de fijación del brazo: operaciones realizadas en el programa. Fuente: Propia.

3.2.2.3. Perfil tubular redondo

Este perfil se diseñó y se le asignó material en **fibra de carbono**. Su geometría es sencilla y, con base en las medidas y especificaciones requeridas, resulta idéntico al fabricado para el modelo existente en sitio.

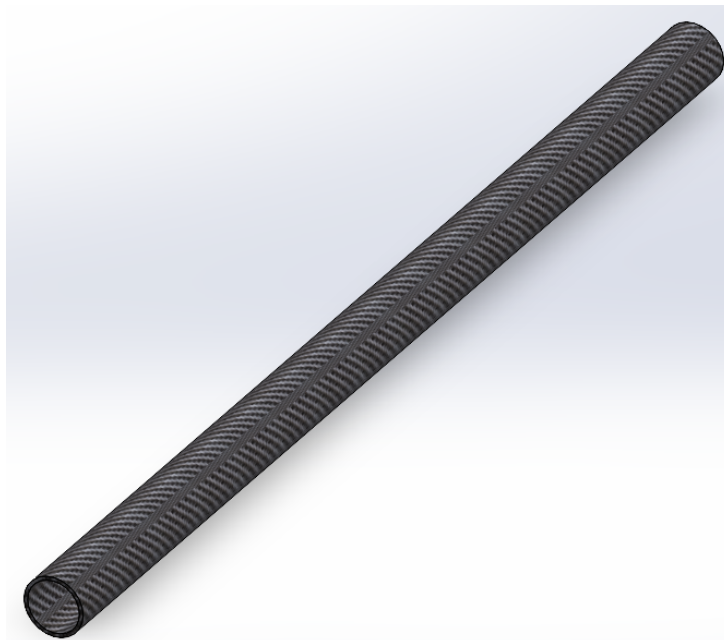


Figura 3.2.4: Perfil tubular en vista isométrica. Fuente: Propia.

Las operaciones realizadas para la creación del modelo fueron las siguientes:

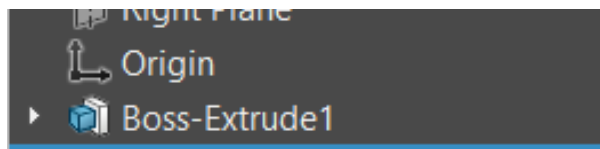


Figura 3.2.5: Perfil tubular: operaciones realizadas en el programa. Fuente: Propia.

3.2.2.4. Abrazaderas de motor al tubo

Estas abrazaderas funcionan como elemento de fijación para la estructura que sostiene el motor en cada brazo del dron. Se diseñaron con un espesor variable entre 4mm y 6mm, con el fin de conservar un peso bajo. Cada extremo cuenta con dos perforaciones pasantes de diámetro 2.5mm, permitiendo el paso de un tornillo M2 y sujeción mediante la tuerca.

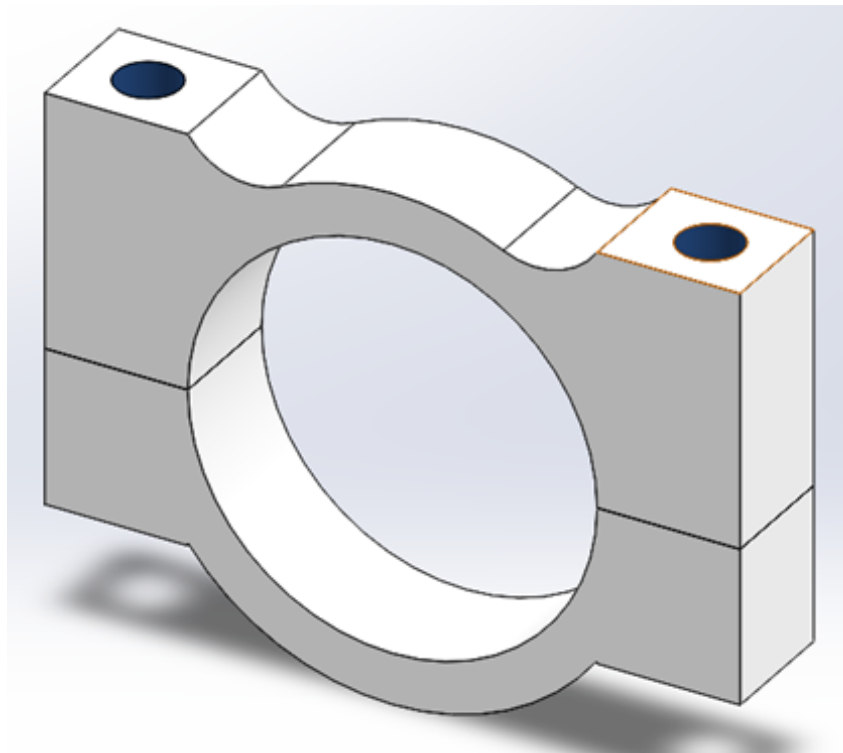


Figura 3.2.6: Abrazaderas de tubo en vista isométrica. Fuente: Propia.

Las operaciones realizadas se listan a continuación:

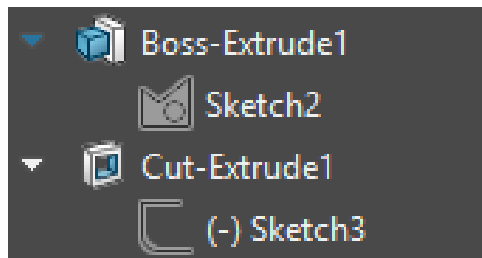


Figura 3.2.7: Operaciones de las abrazaderas de tubo. Fuente: Propia.

3.2.2.5. Platina de fijación del motor

La platina cumple la función de ser la pieza principal que acopla el motor al brazo. Su diseño incluye una distribución de perforaciones que permite montar diferentes tipos de motores, otorgando flexibilidad al usuario en la selección. Esta característica será empleada más adelante como parámetro de análisis.

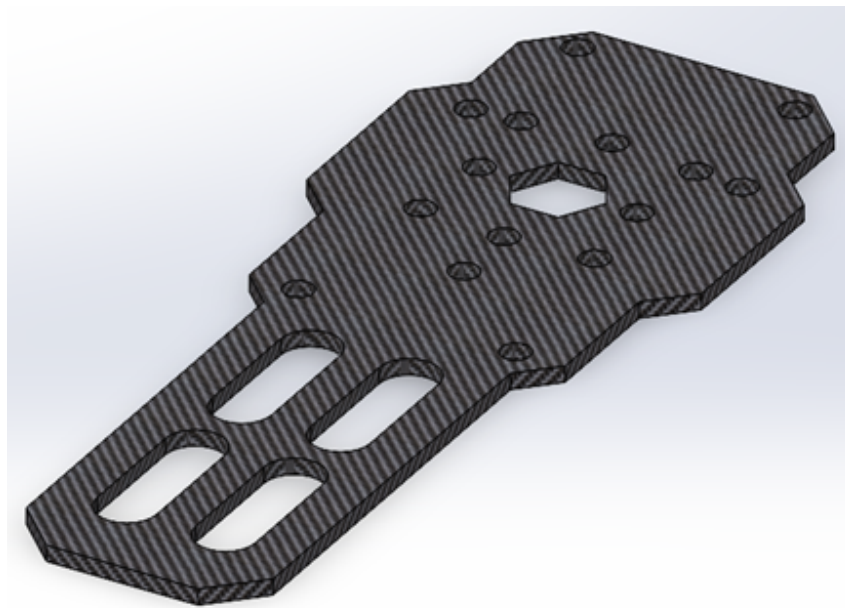


Figura 3.2.8: Platina de fijación del motor en vista isométrica. Fuente: Propia.

Las operaciones realizadas en el modelado fueron las siguientes:

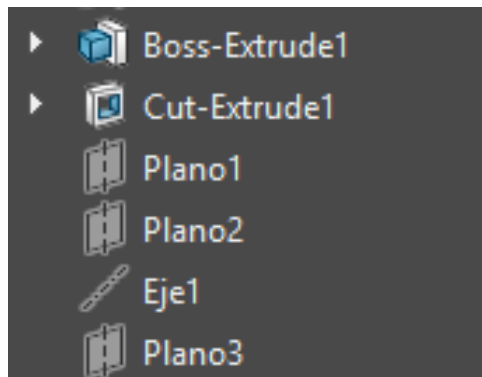


Figura 3.2.9: Operaciones de la platina de fijación del motor. Fuente: Propia.

3.3. Cálculos de fuerzas de empuje del Motor T-Motor MN3510 KV700 (4S, Hélice 30.72 cm)

Los cálculos incluyen potencia, velocidad de giro, torque y empuje resultante del conjunto motor-hélice.

3.3.1. Potencia máxima del motor

El fabricante especifica una potencia continua máxima de 555 W (en 180 s) y una corriente límite de 25 A con batería 4S. Con la hélice de 30,72 cm (12" × 4"), las pruebas muestran que a 14,8 V y 100% de acelerador, el motor consume 16,8 A (aprox. 248,6 W) y genera el empuje máximo medido en banco.

A voltaje máximo de la batería (16,8 V), la potencia aumenta según la relación aproximadamente lineal con el voltaje:

$$P \approx V \cdot I$$

Ejemplos prácticos:

$$P_{14,8} = 14,8 \times 16,8 = 248,6 \text{ W}$$

$$P_{16,8} = 16,8 \times 18,5 = 310,8 \text{ W}$$

3.3.2. Cálculo de RPM (estimado)

$$n_0 = KV \cdot V, \quad n = k_{\text{carga}} n_0,$$

con $k_{\text{carga}} = 0,80$ para hélice de 12 pulgadas.

Para 14.8 V:

$$n_0 = 700 \times 14,8 = 10360 \text{ rpm}, \quad n = 0,80 \times 10360 \approx 8300 \text{ rpm}.$$

Para 16.8 V:

$$n_0 = 700 \times 16,8 = 11760 \text{ rpm}, \quad n = 0,80 \times 11760 \approx 9400 \text{ rpm}.$$

Resultado: RPM máximo estimado: $n_{\text{máx}} \approx 9400 \text{ rpm}$.

3.3.3. Cálculo de potencia eléctrica útil

$$P = V \cdot I$$

$$P_{14,8} = 248,64 \text{ W}, \quad P_{16,8} = 310,80 \text{ W}.$$

3.3.4. Cálculo del torque

$$T = \frac{P}{\omega}, \quad \omega = 2\pi \frac{n}{60}$$

Conversión de rpm a rad/s:

$$\omega_{14,8} = 2\pi \frac{8300}{60} = 869,6 \text{ rad/s}, \quad \omega_{16,8} = 2\pi \frac{9400}{60} = 985,0 \text{ rad/s}.$$

Torque:

$$T_{14,8} = \frac{248,64}{869,6} = 0,286 \text{ N}\cdot\text{m}, \quad T_{16,8} = \frac{310,80}{985,0} = 0,316 \text{ N}\cdot\text{m}.$$

Resultado: Torque máximo útil estimado: $T \approx 0,32 \text{ N}\cdot\text{m}$.

3.3.5. Cálculo del empuje E

Empuje medido experimentalmente a 14.8 V:

$$E_{14,8} = 1,6 \text{ kgf} = 1,6 \times 9,80665 = 15,69 \text{ N}.$$

El empuje escala con el cuadrado de la velocidad de giro para la misma hélice:

$$E \propto n^2$$

Escalado a 16.8 V:

$$\left(\frac{n_{16,8}}{n_{14,8}}\right)^2 = \left(\frac{9400}{8300}\right)^2 = 1,2826$$

$$E_{16,8} = 15,69 \times 1,2826 = 20,12 \text{ N}$$

Conversión a kgf:

$$E_{16,8} = \frac{20,12}{9,80665} = 2,05 \text{ kgf}$$

Resultado de empuje:

$$E_{14,8} = 15,7 \text{ N}, \quad E_{16,8} = 20,1 \text{ N}.$$

3.3.6. Resumen de valores finales

- RPM máximo estimado: 9400 rpm
- Torque máximo útil: $T \approx 0,32 \text{ N}\cdot\text{m}$
- Potencias: $P_{14,8} = 248,6 \text{ W}$, $P_{16,8} = 310,8 \text{ W}$
- Empuje: $E_{14,8} = 15,7 \text{ N}$, $E_{16,8} = 20,1 \text{ N}$

3.3.7. Fórmulas utilizadas

$$n_0 = KV \cdot V$$

$$n = k_{\text{carga}} \cdot n_0$$

$$P = V \cdot I$$

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60}$$

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$E \propto n^2 \quad (\text{para hélice constante})$$

3.3.8. Sistema de coordenadas y transmisión de cargas

La Figura 3.4.1 muestra el sistema de ejes locales del soporte del motor (pieza roja) y del anclaje al chasis (pieza amarilla). La fuerza de empuje E actúa sobre el eje local Z del motor, transmitiéndose secuencialmente por:

1. hélice \rightarrow motor,
2. motor \rightarrow soporte (rojo),
3. soporte \rightarrow tubo de carbono (carga axial),
4. tubo \rightarrow anclaje del chasis (amarillo).

3.3.9. Análisis de los momentos debidos al empuje

Sea E la fuerza de empuje y $\mathbf{e} = (e_x, e_y, 0)$ la excentricidad respecto al eje del brazo. El momento producido es:

$$\mathbf{M}_E = \mathbf{r} \times \mathbf{E} = (e_x, e_y, 0) \times (0, 0, E) = (E e_y, -E e_x, 0).$$

Magnitud del momento:

$$M_E = E \sqrt{e_x^2 + e_y^2} = E e.$$

Caso práctico

- $E_{14,8} = 15,69 \text{ N}$

- $E_{16,8} = 20,21 \text{ N}$
- $e = 0,015 \text{ m}$

$$M_{E,14,8} = 15,69 \cdot 0,015 = 0,235 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$M_{E,16,8} = 20,21 \cdot 0,015 = 0,303 \text{ N}\cdot\text{m}$$

3.3.10. Aplicación en FEA

- Aplicar la fuerza E en su punto real desplazado (e_x, e_y) genera automáticamente el momento.
- Alternativamente: aplicar una carga axial centrada mas el momento equivalente M_E .

3.4. Diagrama de cuerpo libre

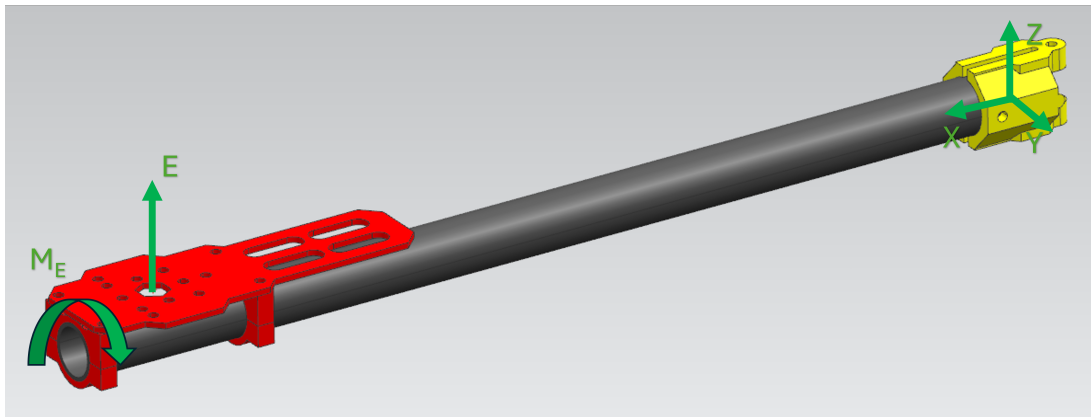


Figura 3.4.1: Diagrama de cuerpo libre del brazo del dron. Elaboración propia

3.5. Análisis estático del brazo original del dron Tarot 450

En esta fase se realizó un análisis estático por el método de elementos finitos (FEA) utilizando el software *Siemens NX*. El objeto de estudio corresponde al brazo original del dron Tarot 450 (ver Figura 3.5.1). El propósito del análisis fue evaluar la respuesta estructural del brazo ante cargas representativas de operación, tales como el peso propio, las fuerzas de empuje generadas por el motor y las reacciones en los puntos de fijación. A partir de estos esfuerzos se determinaron los desplazamientos, tensiones y factores de seguridad, con el fin de identificar zonas críticas y proponer mejoras de diseño o alternativas de material.

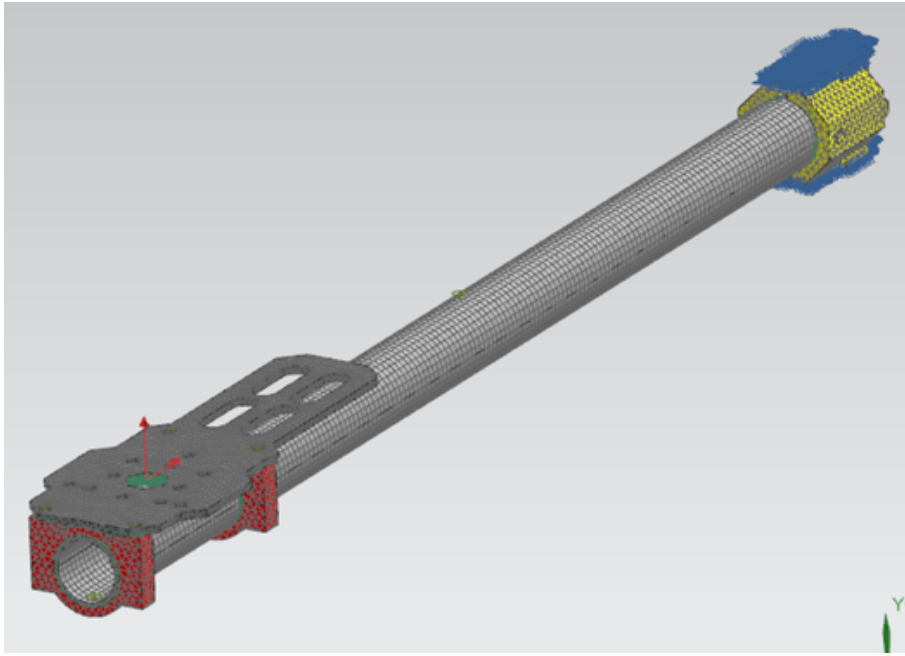


Figura 3.5.1: Brazo original en vista isométrica con cargas. Fuente: propia.

3.5.1. Preparación del modelo .fem

En esta etapa se creó y validó el archivo `.fem`, el cual constituye la representación numérica completa del brazo antes de ejecutar la simulación. Este archivo contiene la malla, las propiedades de material y sección, los conjuntos de nodos y elementos (*collectors*), los vínculos y la conectividad entre componentes. El objetivo es garantizar un modelo coherente y verificable para los estudios posteriores realizados en el archivo `.sim`.

Durante esta fase se verificó la calidad de la malla, se corrigieron interferencias geométricas y se configuraron los elementos adecuados (*tetra*, *hexa*, *shell* o *beam*) junto con los sistemas de coordenadas locales necesarios para aplicar correctamente las cargas y restricciones.

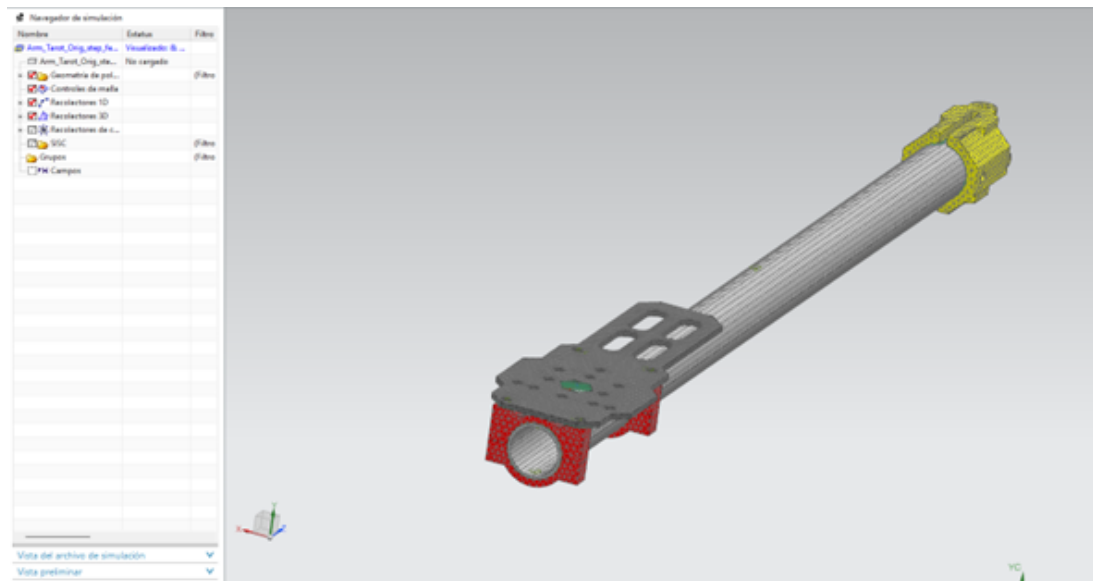


Figura 3.5.2: Archivo .fem con lista de operaciones. Fuente: propia.

3.5.2. Gestión y asignación de materiales

Como primer paso, se revisaron los materiales asignados a los componentes del ensamblaje, asegurando que cada uno contara con las propiedades mecánicas adecuadas. El análisis inició con el material ABS, verificando que las propiedades incluidas en el programa coincidieran con los valores reportados en bibliografía o fuentes técnicas confiables.

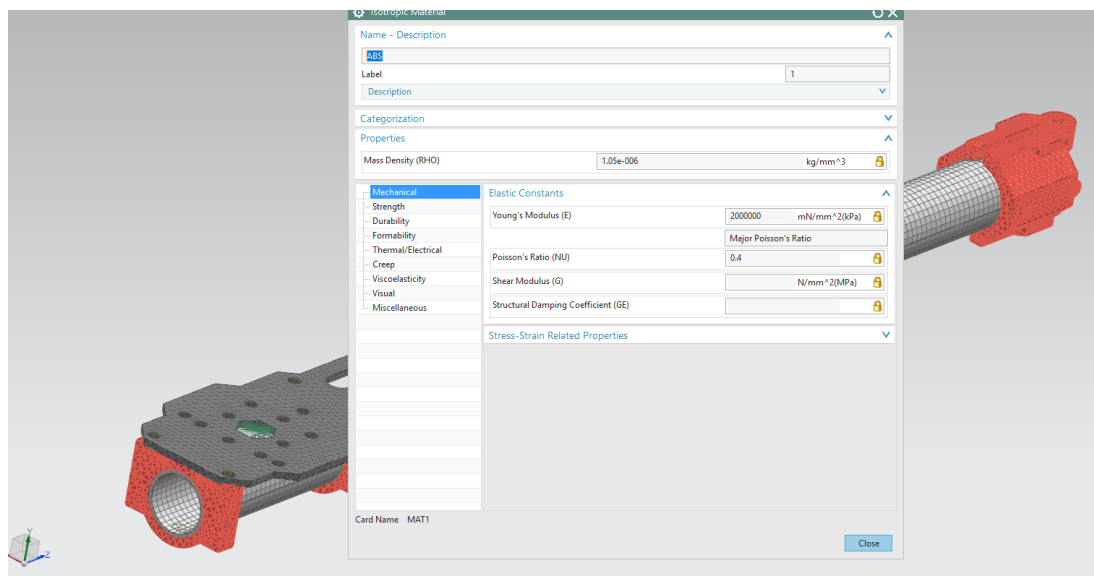


Figura 3.5.3: Gestor de materiales, Inspección de material ABS. Fuente: propia.

De forma análoga, se evaluó la fibra de carbono correspondiente al tubo principal del brazo. Este material fue seleccionado considerando su similitud con el utilizado en la fabricación original del

componente comercial.

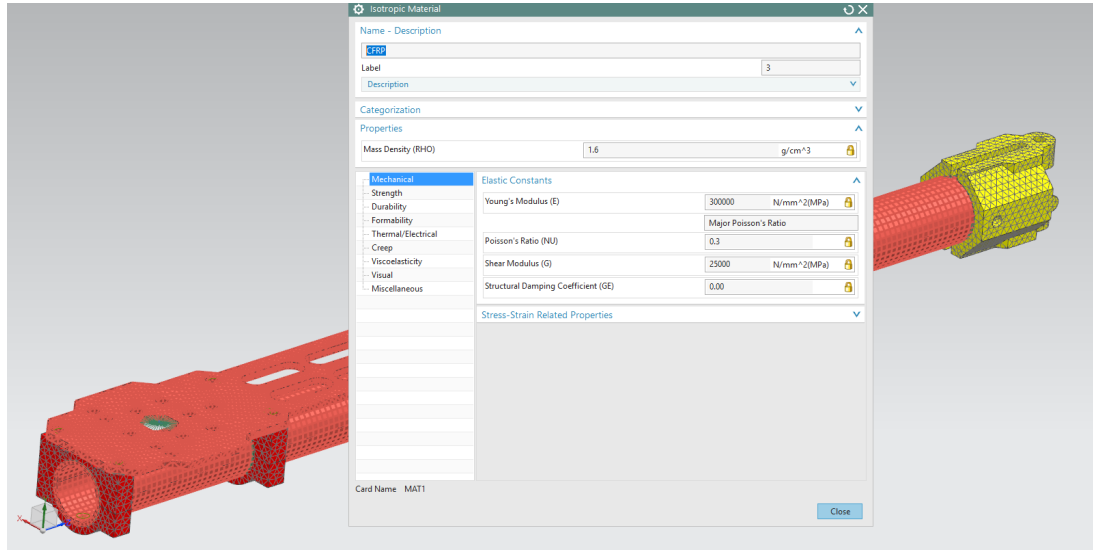


Figura 3.5.4: Inspección de material: fibra de carbono. Fuente: propia.

3.5.3. Definición de mallas

El proceso de mallado se realizó individualmente para cada componente del ensamblaje utilizando el *Mesh Collector*, herramienta que permite definir parámetros específicos de cada malla, su topología y su interacción con el material asignado.

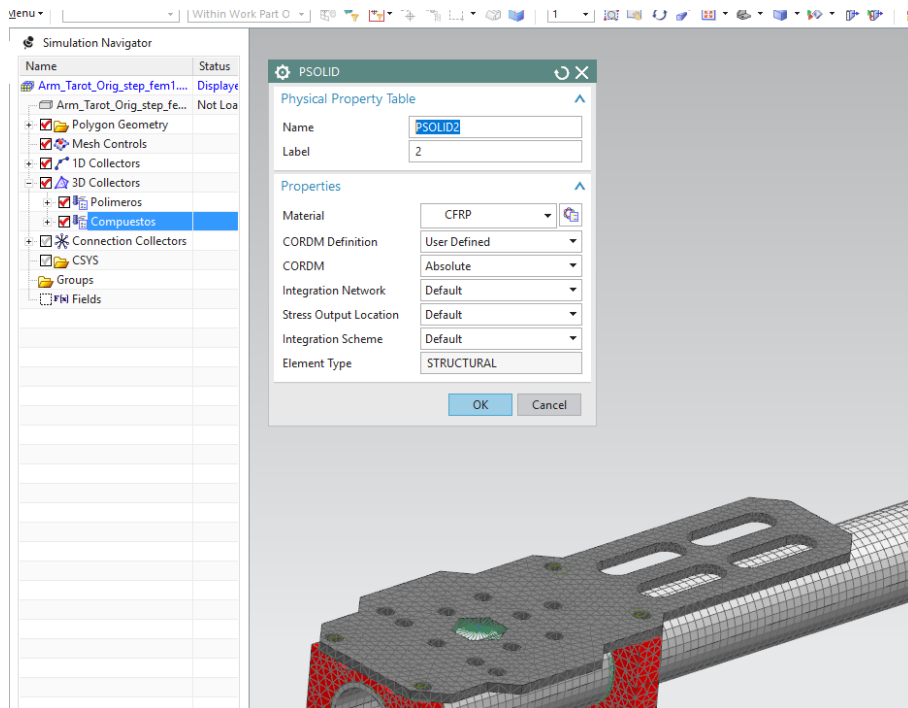


Figura 3.5.5: Recolector de mallas. Fuente: propia.

Para las zonas sometidas a cargas localizadas (por ejemplo, el punto de empuje del motor o la fijación del brazo al chasis), se utilizaron mallas de tipo 1D, las cuales permiten representar el comportamiento lineal de los esfuerzos en esas superficies.

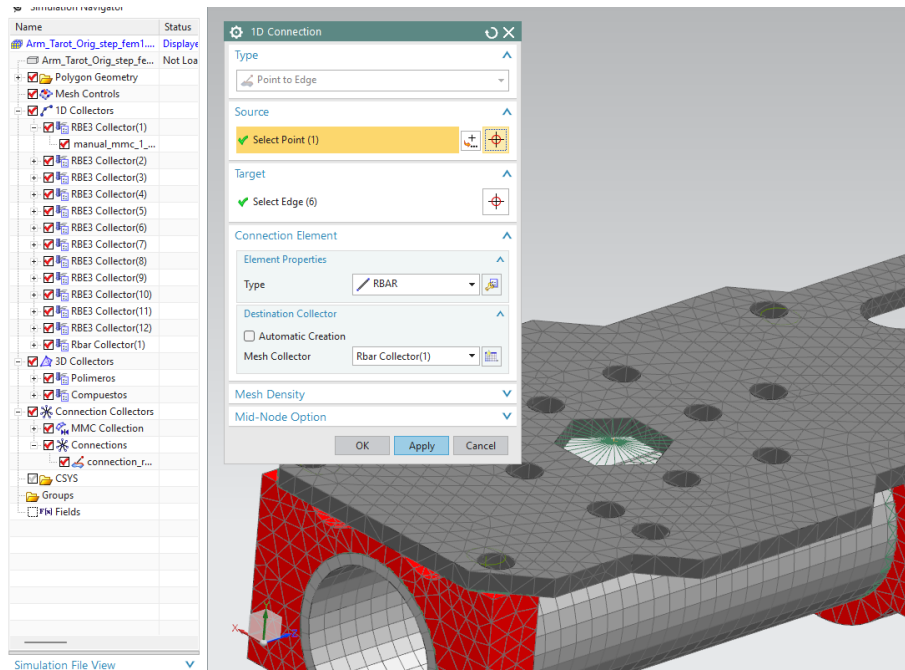


Figura 3.5.6: Recolector de mallas 1D. Fuente: propia.

Una vez definidas las mallas 1D, se procedió con el mallado tetraédrico 3D para las piezas fabricadas en ABS, como los soportes y abrazaderas. Este tipo de malla permite representar geometrías complejas y resolver con precisión los esfuerzos volumétricos.

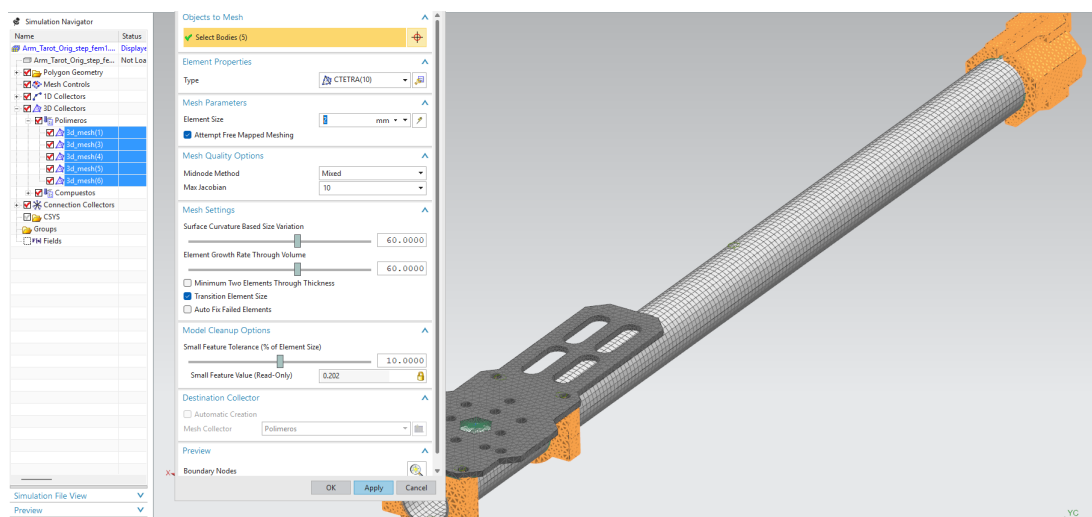


Figura 3.5.7: Recolector de malla tetraédrica 3D para material ABS. Fuente: propia.

Posteriormente, se ajustaron los parámetros de refinamiento y calidad de malla, verificando que

el tamaño de los elementos fuera adecuado según la geometría del componente.

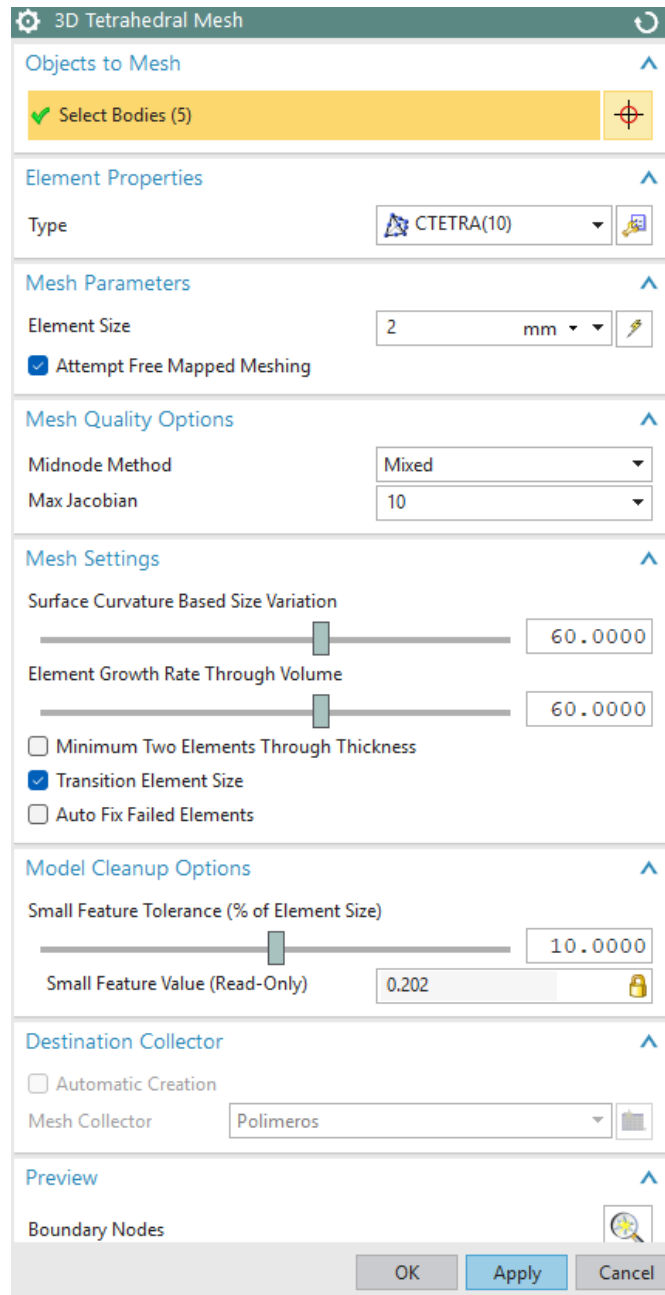


Figura 3.5.8: Interfaz de edición de malla (material ABS). Fuente: propia.

Las piezas malladas con ABS se muestran resaltadas en la Figura 3.5.9.

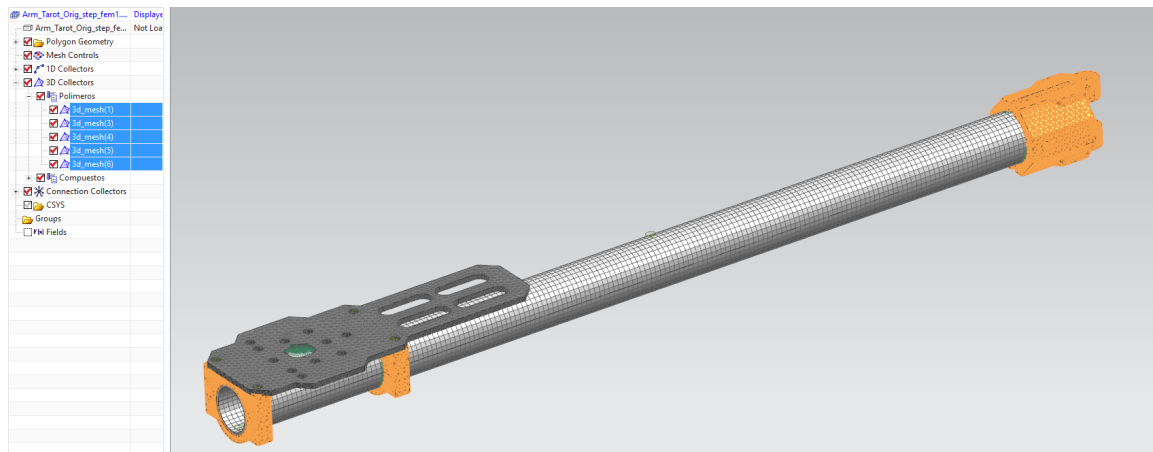


Figura 3.5.9: Piezas de ensamblaje con material ABS. Fuente: propia.

Finalmente, se aplicó el mallado tetraédrico para las piezas fabricadas en fibra de carbono: la lámina superior del motor y el tubo estructural del brazo. Dado que sus geometrías presentan diferencias significativas, ambas fueron malladas de forma independiente para evitar errores de cálculo.

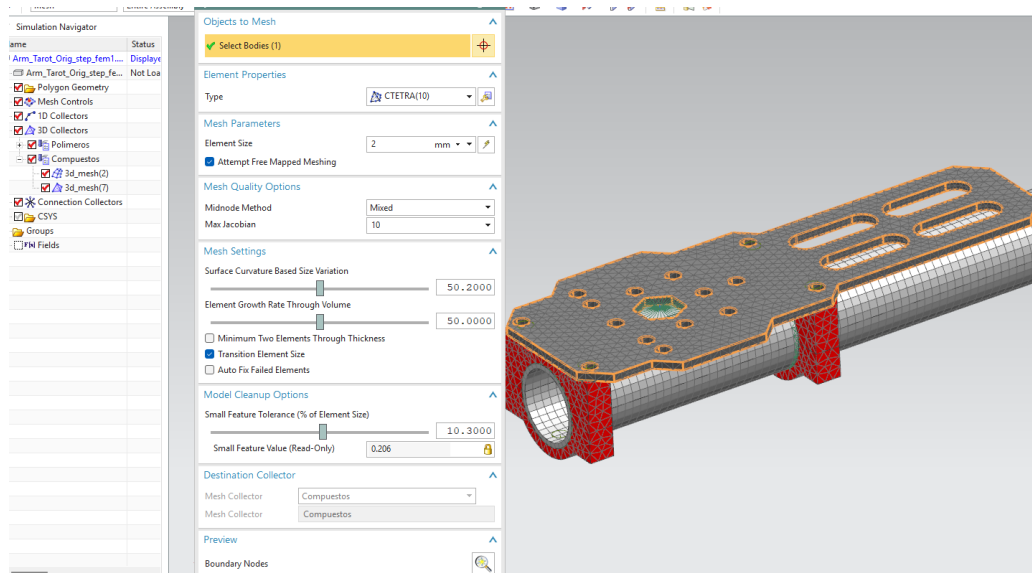


Figura 3.5.10: Interfaz de edición de malla, malla de la placa soporte motor con elementos TETRA(10) (fibra de carbono – lámina). Fuente: propia.

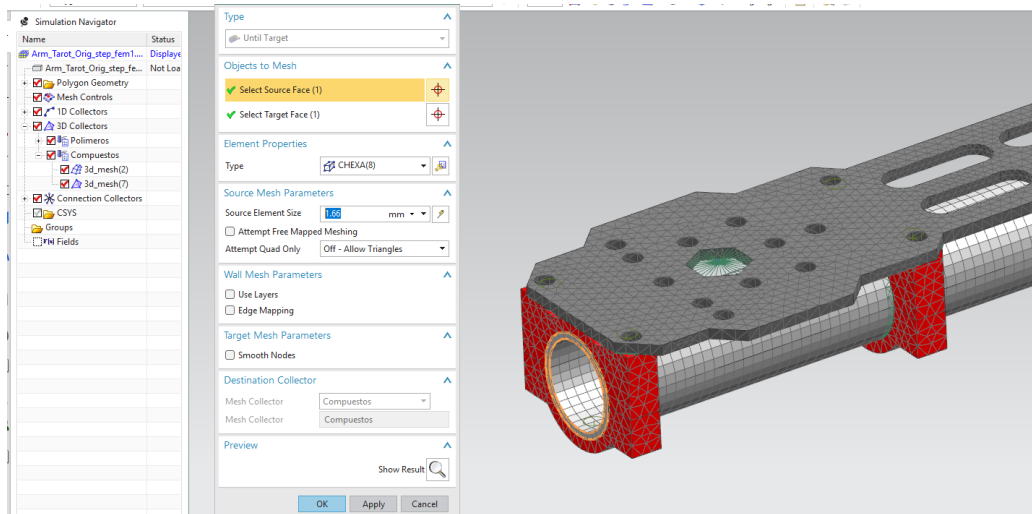


Figura 3.5.11: Interfaz de edición de malla, mallado del brazo con elementos CHEXA(8) (fibra de carbono – tubo). Fuente: propia.

3.5.4. Definición de conexiones y condiciones de contacto

Una vez finalizado el mallado, se definieron las conexiones entre los componentes del ensamblaje. Estas uniones representan los diferentes tipos de sujeción presentes en el modelo real: contactos por fricción, ajustes geométricos, uniones atornilladas y roscadas, entre otros. Su correcta representación permite determinar las reacciones y esfuerzos transmitidos entre las piezas durante la operación.

Se emplearon conexiones tipo nodo 1D para representar la transmisión de torque en el eje del motor (Figura 3.5.12), y posteriormente se aplicaron acoplamientos de malla para definir los contactos entre superficies adyacentes.

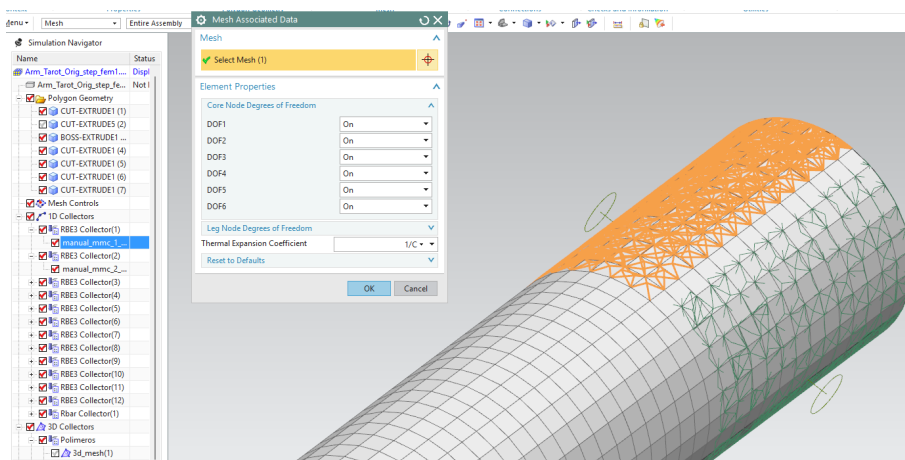


Figura 3.5.12: Conexión tipo nodo 1D. Fuente: propia.

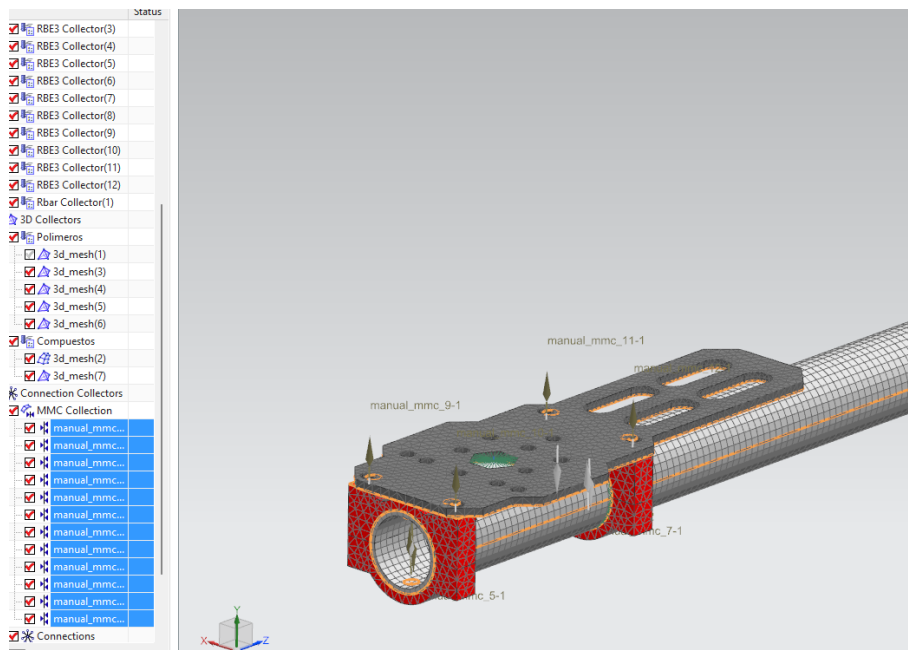


Figura 3.5.13: Conexión mediante acoplamiento de mallas. Fuente: propia.

Este proceso garantiza una representación física y numérica precisa del comportamiento estructural del brazo, lo que permitirá obtener resultados consistentes en el análisis posterior.

3.6. Propuesta de Rediseño

Propuestas de rediseño y mejoras estructurales para el brazo del dron:

- **Alternativas de Rediseño del Brazo:**

SolidWorks se constituyó como la herramienta principal en el proceso de rediseño del brazo, dado que permite la integración de modelos paramétricos con análisis mecánicos fundamentales para el desarrollo de la investigación.

3.6.1. Propuesta de rediseño 1

A partir de esta plataforma se implementaron modificaciones estructurales orientadas a optimizar la estabilidad del conjunto, entre las cuales se destaca la incorporación de superficies planas estratégicamente ubicadas en la zona de unión, con el propósito de disminuir la probabilidad de rotación indeseada del brazo en los soportes.

Se desarrolló un nuevo concepto de diseño para el brazo del dron, en el cual se realizaron ajustes dimensionales y se optimizó la geometría con el fin de reducir el número de piezas

requeridas. Dichas modificaciones se llevaron a cabo siguiendo las recomendaciones del asesor académico, lo que permitió garantizar una mejora respecto a la versión original y, al mismo tiempo, mitigar las deficiencias previamente identificadas.

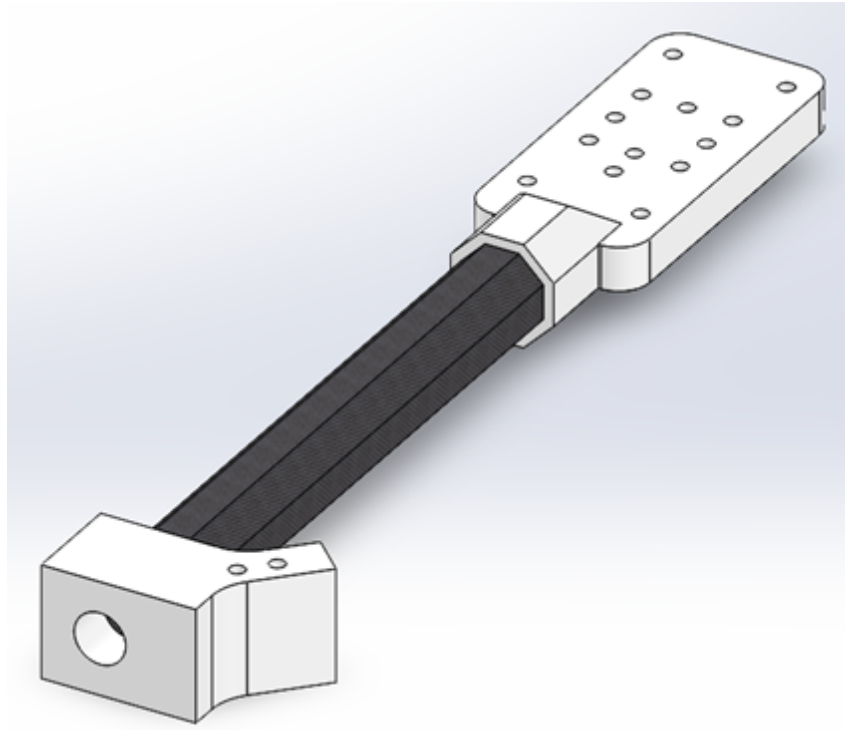


Figura 3.6.1: Propuesta rediseño 1 en vista isométrica. Fuente: Propia.

3.6.1.1. Nuevo brazo tubular

El rediseño se inició mediante la modificación de la geometría del perfil tubular, sustituyendo la sección transversal circular por una octagonal. Se mantuvo el diámetro nominal original de $\text{Ø}16$ mm, medido de extremo a extremo en el nuevo perfil, con el objetivo de incrementar la capacidad de sujeción y mejorar el comportamiento estructural en comparación con el modelo original.

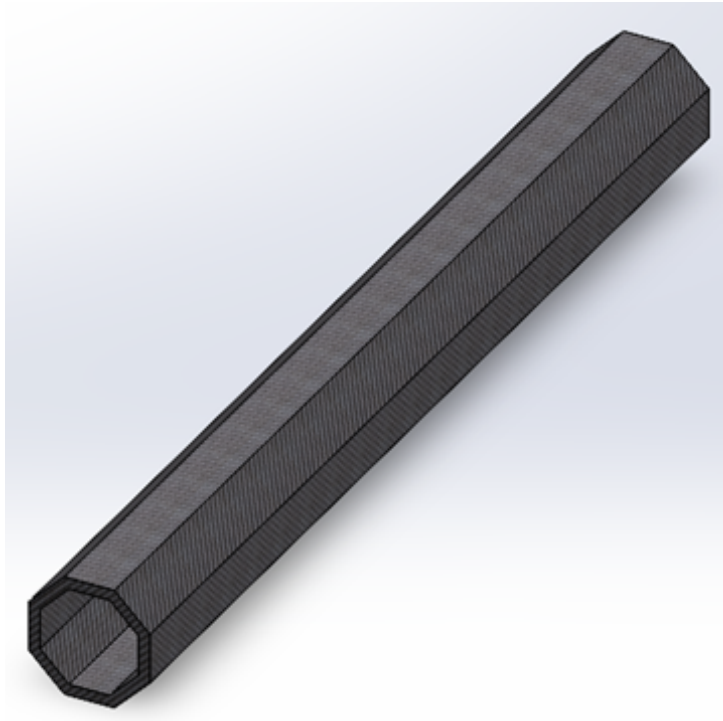


Figura 3.6.2: Perfil tubular octagonal en vista isométrica. Fuente: Propia.

Lista de operaciones requeridas:

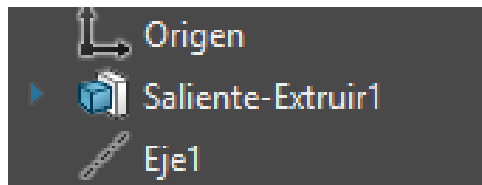


Figura 3.6.3: Operaciones de Perfil tubular octagonal. Fuente: Propia.

3.6.1.2. Nuevo soporte de sujeción del motor

En el caso del soporte de sujeción del motor, se conservaron las perforaciones de fijación presentes en el diseño base; sin embargo, el espesor de la pieza fue reducido de 17.75 mm a 8.5 mm con el propósito de disminuir su peso. Adicionalmente, la nueva configuración geométrica facilita el proceso de ensamblaje, permitiendo una integración más eficiente del motor con el tubo estructural.

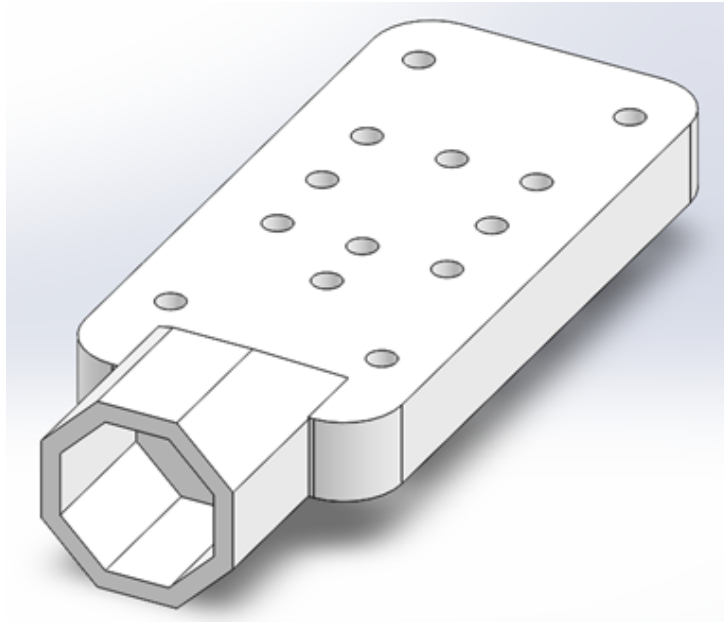


Figura 3.6.4: Sujetador de motor en vista isométrica. Fuente: Propia.

Operaciones de esta pieza:

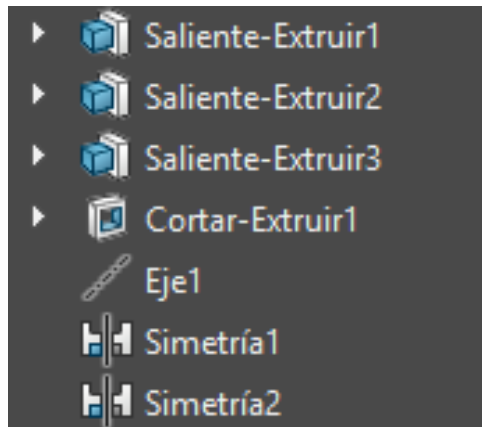


Figura 3.6.5: Operaciones en sujetador de motor. Fuente: Propia.

3.6.1.3. Nuevo sujetador del brazo

Para resolver el problema deslizante del soporte anterior, que solo tenía dos perforaciones de sujeción, se aumentó el número a cuatro (rosca M3.5x0.35). Además, se incrementó el área de contacto para disminuir la pérdida de fricción y se agregó una perforación roscada M5x0.8 para un prisionero que fije el perfil octagonal.

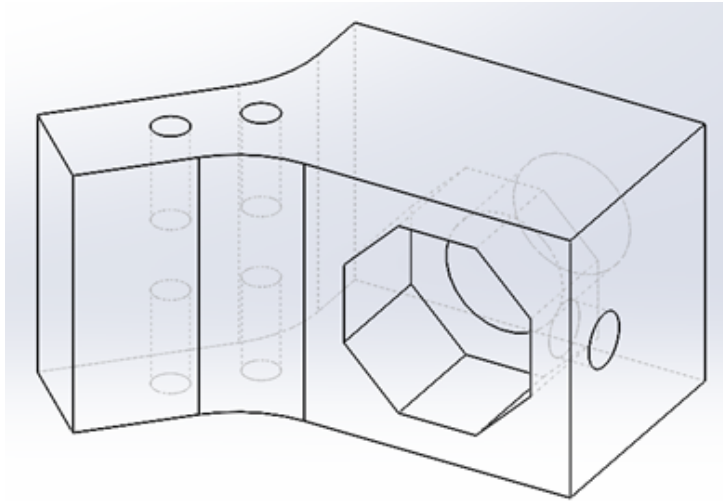


Figura 3.6.6: Sujetador de brazo en vista isométrica. Fuente: Propia.

Lista de operaciones de esta pieza:

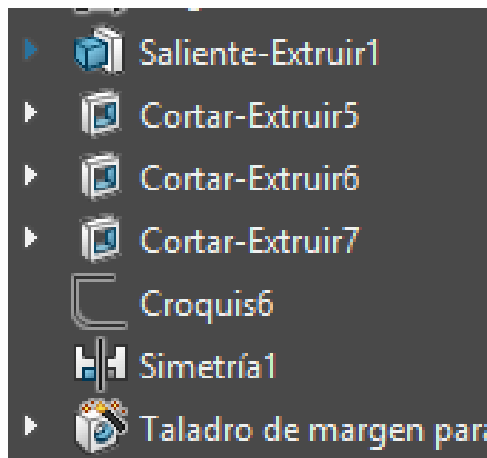


Figura 3.6.7: Operaciones de sujetador de brazo. Fuente: Propia.

3.6.2. Propuesta de rediseño 2

En esta segunda propuesta de rediseño se consideró el uso de un perfil tubular comercial, lo que permitió mantener en gran medida la morfología de las piezas originales, asegurando la compatibilidad con el diseño previo y facilitando su manufactura.



Figura 3.6.8: Perfil tubular octogonal en fibra de carbono utilizado para el rediseño del brazo del dron (RJX Hobby, 2025).

A partir de esta plataforma se introdujeron modificaciones estructurales orientadas a incrementar la estabilidad del conjunto, entre las cuales sobresale la incorporación de superficies planas estratégicamente ubicadas en la zona de unión, con el objetivo de reducir la posibilidad de rotación indeseada del brazo en los soportes.

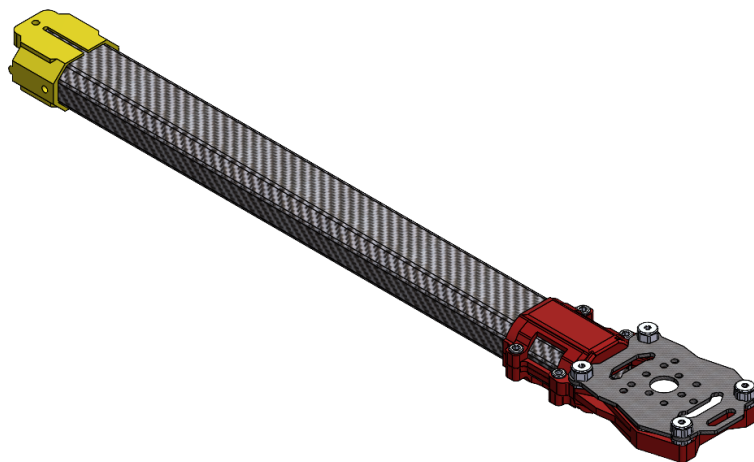


Figura 3.6.9: Propuesta de rediseño 2 en vista isométrica. Fuente: Propia.

3.6.2.1. Brazo tubular propuesta 2

El perfil tubular propuesto presenta una geometría octagonal irregular con dimensiones externas de 30,00 mm en el eje horizontal y 20,00 mm en el eje vertical. La sección está constituida por ocho lados, en los cuales las aristas superiores e inferiores son de mayor longitud (20,02 mm), mientras que las aristas laterales alcanzan 10,02 mm, garantizando una proporción equilibrada entre altura y anchura.

Los vértices se encuentran biselados mediante cortes a 135° , formando pequeños segmentos que conectan las aristas principales y confieren al perfil una configuración estable frente a cargas de flexión y torsión. Asimismo, se incluye una base inferior de 15,00 mm que proporciona un área de apoyo adicional.

Esta disposición geométrica permite aumentar la rigidez estructural y mejorar la sujeción respecto a un perfil circular equivalente, al tiempo que mantiene un volumen similar y una distribución uniforme de material.

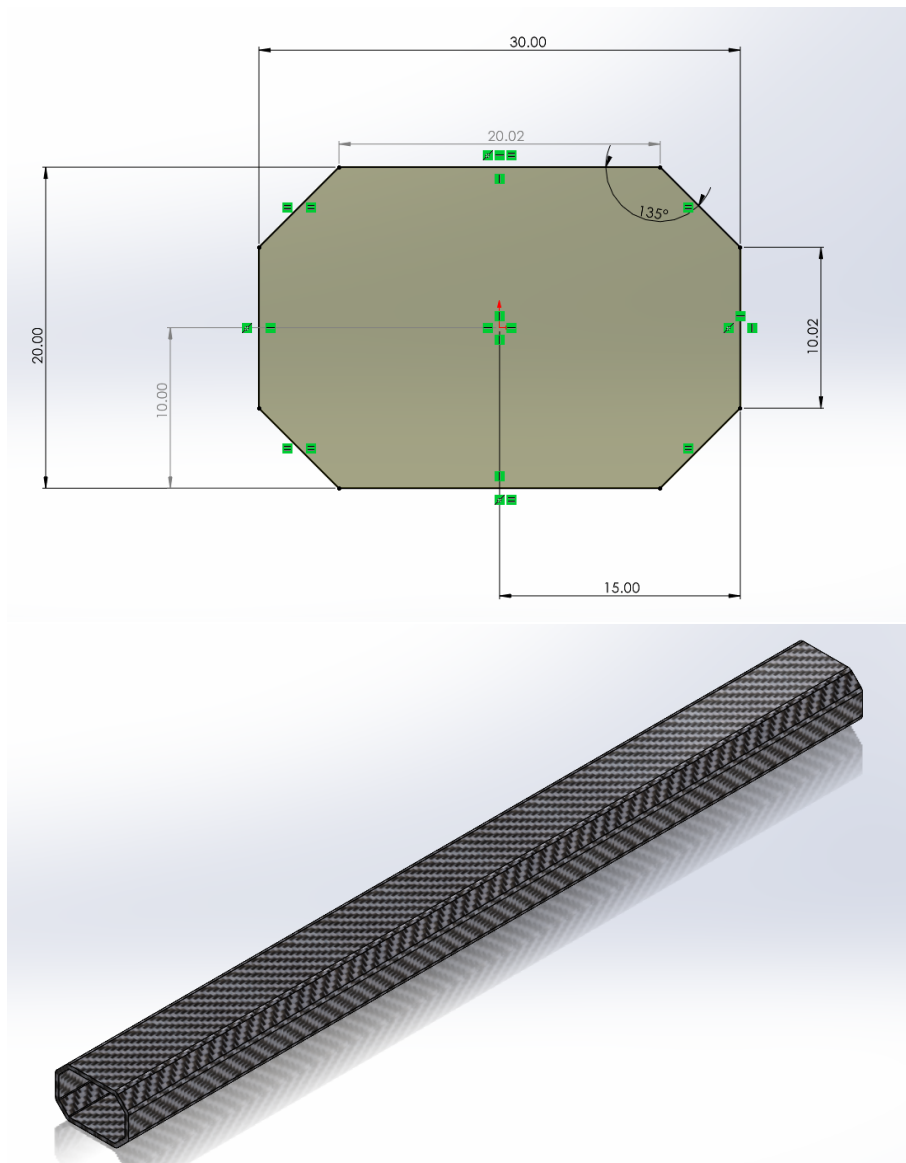


Figura 3.6.10: Rediseño del perfil tubular: a) boceto de la nueva sección transversal octagonal, b) modelo tridimensional del tubo en fibra de carbono. Fuente: Propia.

3.6.2.2. Propuesta 2 soporte de sujeción del motor

En el caso del soporte de sujeción del motor, se conservaron las perforaciones de fijación presentes en el diseño base; sin embargo, el espesor de la pieza fue reducido de 17.75 mm a 8.5 mm con el propósito de disminuir su peso. Adicionalmente, la nueva configuración geométrica facilita el proceso de ensamblaje, permitiendo una integración más eficiente del motor con el tubo estructural.

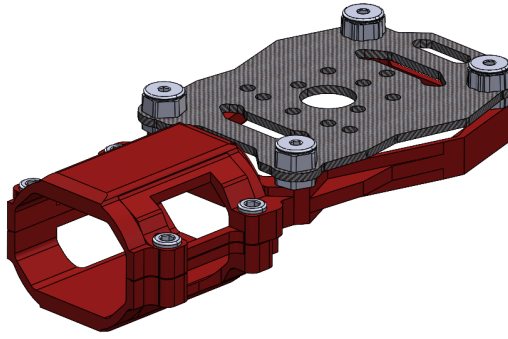


Figura 3.6.11: Soporte de sujeción del motor en vista isométrica. Fuente: Propia.

3.6.2.3. Nuevo sujetador del brazo

Para resolver el problema deslizante del soporte anterior, que solo disponía de dos perforaciones de sujeción, se aumentó el número a cuatro (rosca M3.5x0.35). Además, se incrementó el área de contacto para disminuir la pérdida de fricción y se agregó una perforación roscada M5x0.8 destinada a un prisionero que fija el perfil octagonal.

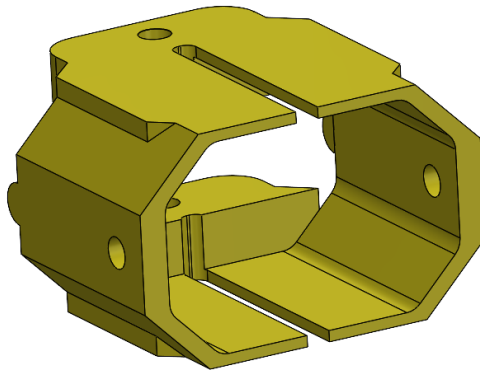


Figura 3.6.12: Sujetador del brazo en vista isométrica. Fuente: Propia.

3.7. Analisis CAE del brazo prototipo propuesta 2

Una vez obtenidos los resultados del primer análisis por elementos finitos del brazo original mediante NX, y tras desarrollar una nueva propuesta de diseño considerando los puntos acordados anteriormente en este documento, se procede a realizar un nuevo análisis estático

bajo los mismos parámetros, cargas y condiciones, siguiendo el mismo procedimiento aplicado en el estudio previo, con el fin de evidenciar los resultados del nuevo diseño

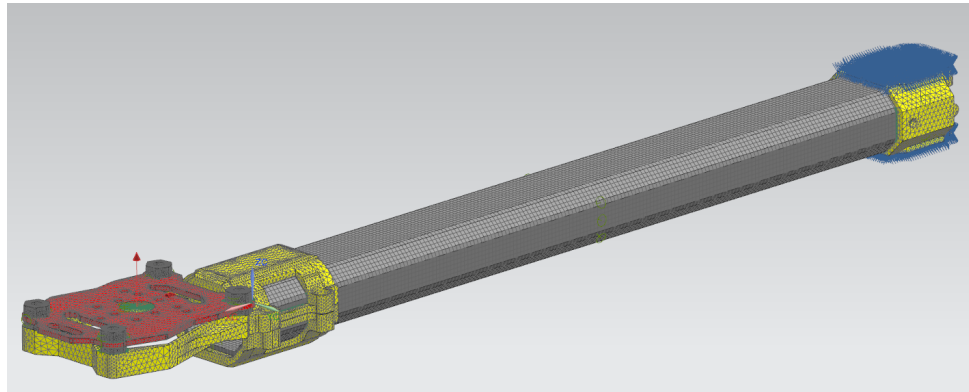


Figura 3.7.1: *Brazo nuevo en vista isométrica con cargas.*

Fuente: Elaboración propia.

3.8. Prototipo y Pruebas Experimentales

Pasos para la validación del rediseño del brazo del dron:

- **Fabricación del Prototipo Modificado:** Para validar el diseño optimizado del brazo, se procedió a la fabricación del prototipo modificado mediante tecnología de impresión 3D (manufactura aditiva). Este proceso permitió materializar las mejoras estructurales y geométricas propuestas durante la etapa de rediseño, manteniendo la precisión dimensional necesaria para el posterior ensamble y análisis funcional.

El modelo tridimensional, previamente generado en el software de diseño asistido por computador (CAD), fue exportado en formato STL y procesado en el programa de laminado (slicer) para definir los parámetros de impresión, tales como orientación de las piezas, altura de capa, relleno interno, temperatura de extrusión y velocidad de deposición.

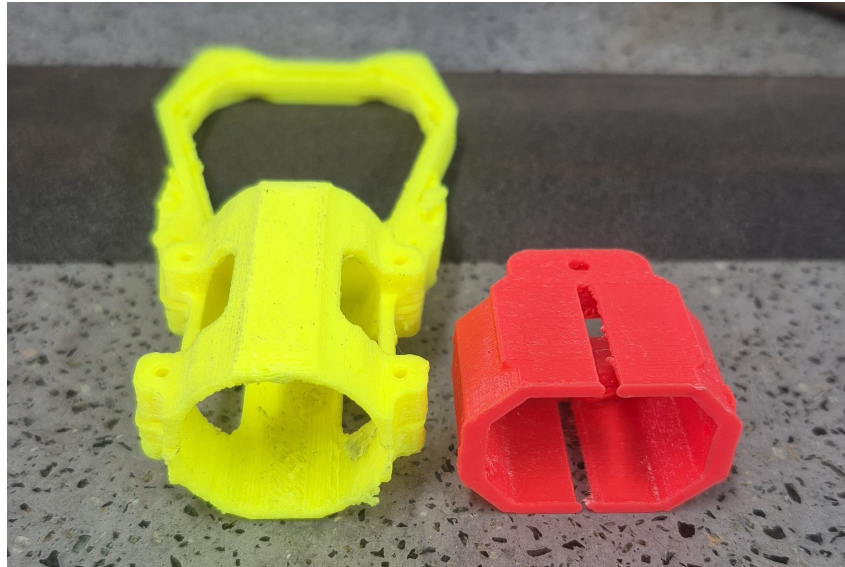


Figura 3.8.1: Piezas soporte de motor impresas en PLA. Elaboración propia

Las piezas se imprimieron utilizando tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) con filamento de PLA debido a su buena estabilidad dimensional, facilidad de impresión y bajo costo. En los componentes que requerían mayor resistencia mecánica se consideró el uso de PETG o ABS, optimizando la densidad de relleno y el número de perímetros para garantizar la rigidez necesaria.

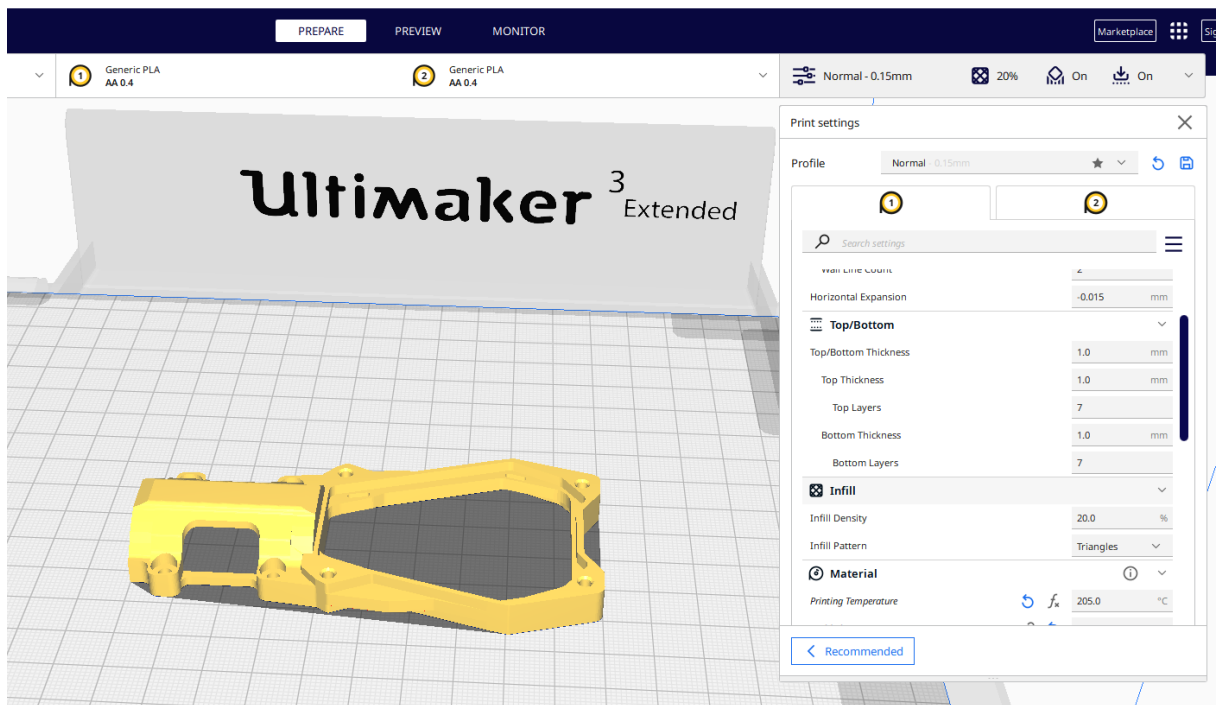


Figura 3.8.2: Vista de los parámetros de impresión configurados en Ultimaker Cura.

Una vez completado el proceso de impresión, se realizaron tareas de postprocesado, que incluyeron la eliminación de soportes, lijado superficial y verificación dimensional con el modelo CAD, asegurando que las piezas cumplieran con las tolerancias establecidas. Finalmente, los componentes fueron ensamblados para evaluar el comportamiento del brazo modificado en condiciones de operación simuladas.

- **Pruebas en Vuelo:** Montar el brazo en el dron y realizar pruebas en condiciones de vuelo real para evaluar si el rediseño mitiga los giros inesperados y mejora la estabilidad.

Inicialmente, se tenía previsto realizar las pruebas en condiciones reales de vuelo con el fin de evaluar el desempeño del brazo modificado, verificando si el rediseño contribuía a mitigar los giros inesperados y mejorar la estabilidad general del dron.

Sin embargo, las pruebas de vuelo no pudieron llevarse a cabo debido a los tiempos de consecución de los brazos fabricados en fibra de carbono, material seleccionado para la versión final del prototipo. Esta limitación impidió disponer de los componentes a tiempo para el montaje y la evaluación experimental.

A pesar de ello, los resultados obtenidos mediante los análisis por elementos finitos y la validación del prototipo impreso en 3D permiten anticipar un comportamiento estructural más estable, lo que servirá como base para futuras pruebas de vuelo una vez se cuente con los brazos en el material definitivo.



Figura 3.8.3: Brazo prototipo del dron ensamblado. Elaboración propia

Capítulo 4

Análisis

4.1. Análisis Comparativo de Resultados (FEA) de Diseños de Brazo

Este análisis compara los resultados obtenidos mediante simulación FEA para dos configuraciones de brazo de soporte: el **Brazo Original** (perfil tubular redondo) y el **Brazo Modificado** (perfil octagonal/rectangular con una nueva base de montaje). El objetivo es evaluar el rendimiento mecánico considerando no solo la rigidez y resistencia estática, sino también los modos de falla a largo plazo, en especial el desgaste por fricción en las interfaces de sujeción y su impacto en la estabilidad del dron durante el vuelo.

4.1.1. Resultados Cuantitativos

Los valores máximos obtenidos en el análisis estático se resumen en la Tabla 4.1.1.

Cuadro 4.1.1: Comparación de resultados FEA entre los dos diseños de brazo.

Métrica de Análisis	Brazo Original	Brazo Modificado	Cambio %
Esfuerzo Máx. (Von Mises)	28.99 MPa	37.13 MPa	+28.1 %
Desplazamiento Máx.	0.454 mm	0.696 mm	+53.3 %
Rotación Nodal Máx.	0.163°	0.456°	+179.8 %

4.2. Análisis Comparativo del Rendimiento

4.2.1. Modo de Falla Torsional (Rigidez vs. Desgaste)

Este aspecto constituye el punto más crítico del estudio, ya que los valores estáticos por sí solos no capturan completamente el comportamiento real en servicio.

Brazo Original

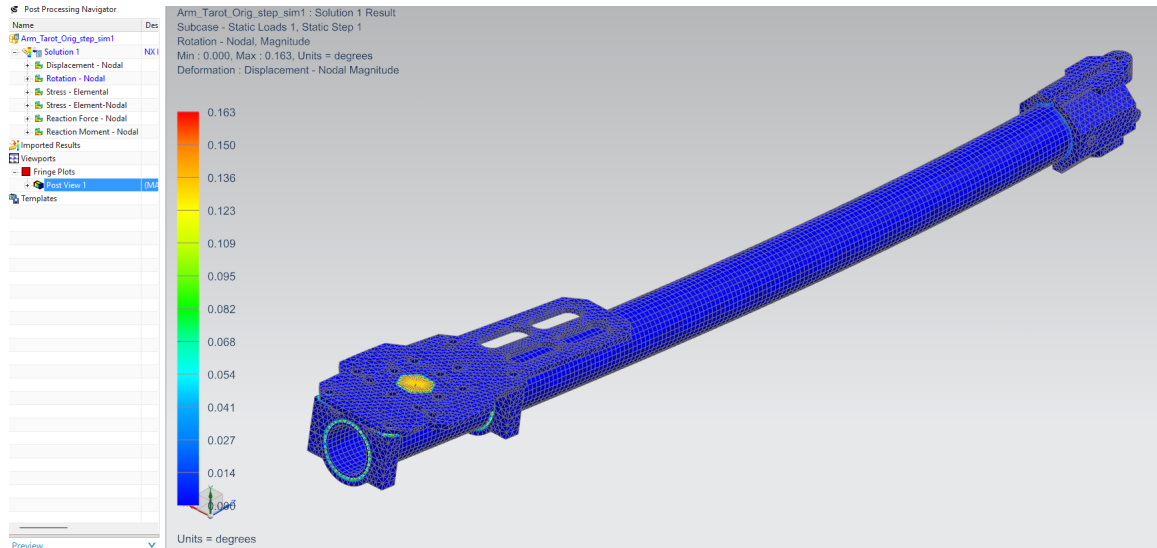


Figura 4.2.1: Rotación nodal del brazo original bajo carga estática, elaboración propia

- El sistema depende de la fricción entre la abrazadera y el perfil tubular redondo para resistir la torsión inducida por el motor.
- La rotación máxima (0.163°) es estáticamente baja, lo cual es favorable. No obstante, como se observa en la concentración de esfuerzos torsionales, esta rotación ocurre en bandas pequeñas de contacto en la abrazadera.
- **Riesgo identificado:** El diseño es altamente susceptible al desgaste por fricción (*fretting*). Cualquier micro-movimiento entre el tubo y la abrazadera puede erosionar el polímero, reduciendo la capacidad de sujeción. Esto permite que el soporte del motor gire gradualmente, provocando desalineación. En operación de vuelo, esto puede ocasionar inestabilidad severa.

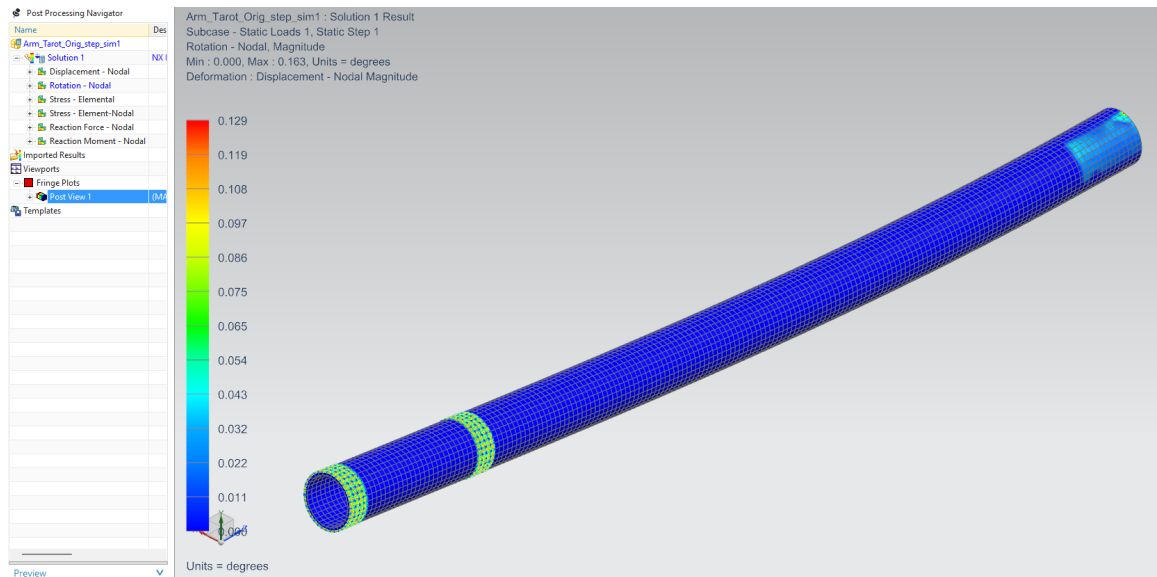


Figura 4.2.2: Concentración de esfuerzos de torsión en las superficies de las abrazaderas del brazo original, elaboración propia.

Brazo Modificado

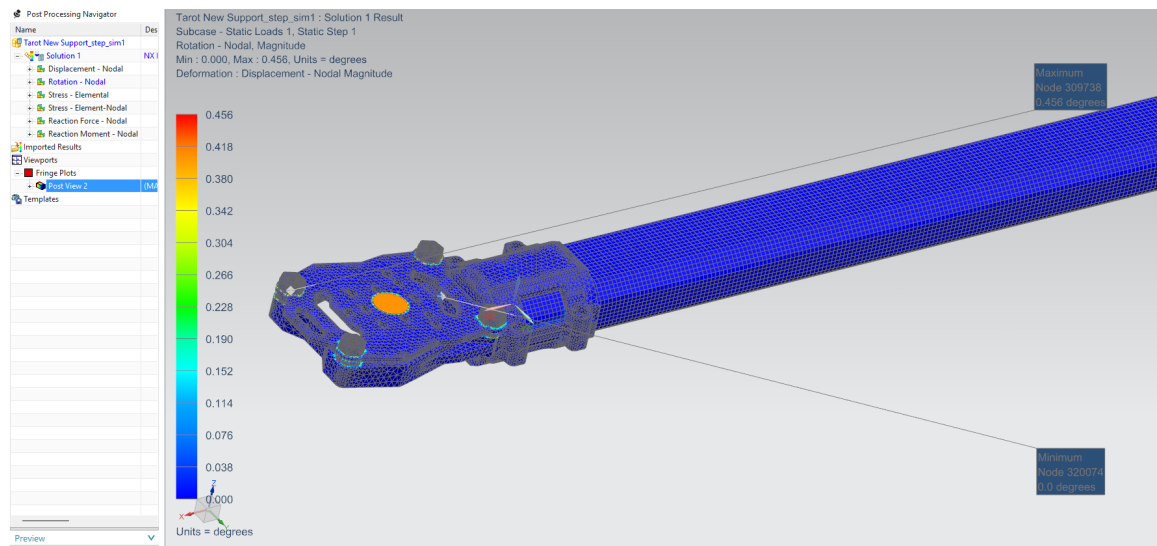


Figura 4.2.3: Rotación nodal del brazo modificado bajo carga estática, elaboración propia.

- El rediseño incorpora un perfil con caras planas que generan un apoyo perpendicular en la abrazadera, estableciendo un bloqueo mecánico contra la rotación.
- Aunque la rotación máxima total es mayor (0.456°), esta deformación es **completamente elástica** y se concentra en la zona del soporte del motor, no en la interfaz.

- **Ventaja principal:** Elimina el movimiento relativo entre superficies de contacto, evitando desgaste y deslizamiento. Esto garantiza una alineación más estable a largo plazo, incluso bajo vibraciones y cargas dinámicas.

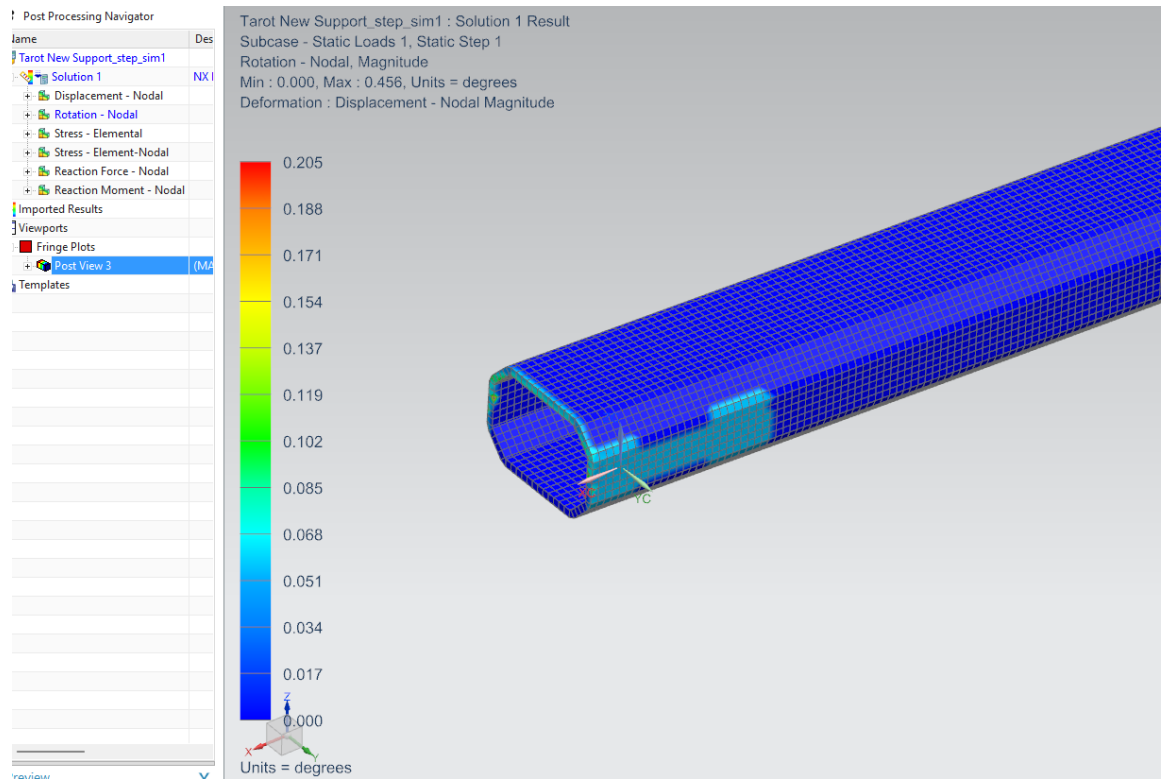


Figura 4.2.4: Concentración de esfuerzos de torsión en las superficies de las abrazaderas del brazo modificado, elaboración propia.

4.2.2. Rigidez Estructural (Flexión)

- **Brazo Original:** desplazamiento máximo de 0.454 mm.

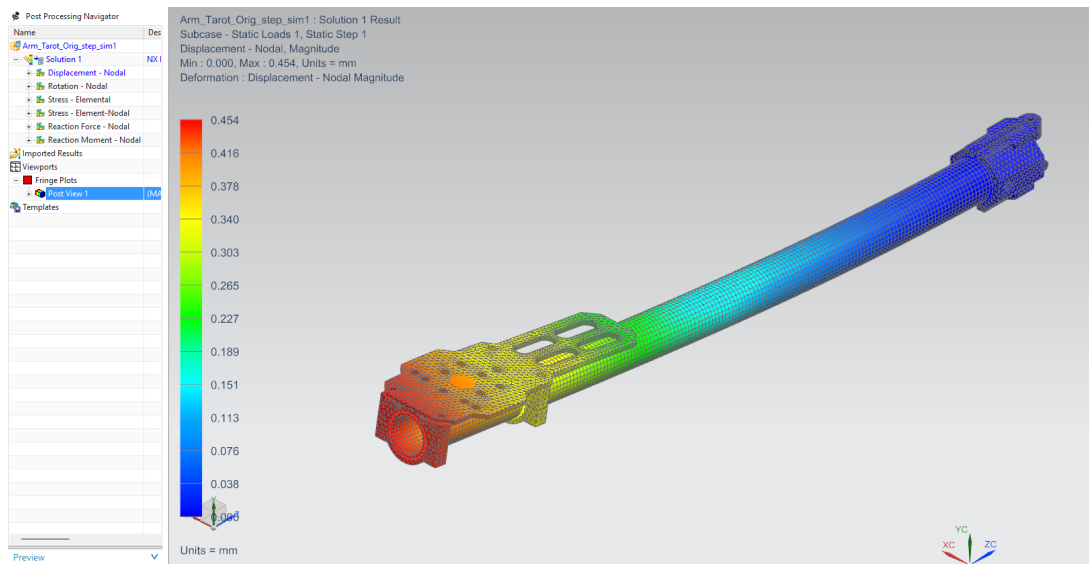


Figura 4.2.5: Desplazamientos nodales del brazo original, elaboración propia.

- **Brazo Modificado:** desplazamiento máximo de 0.696 mm (+53.3%).

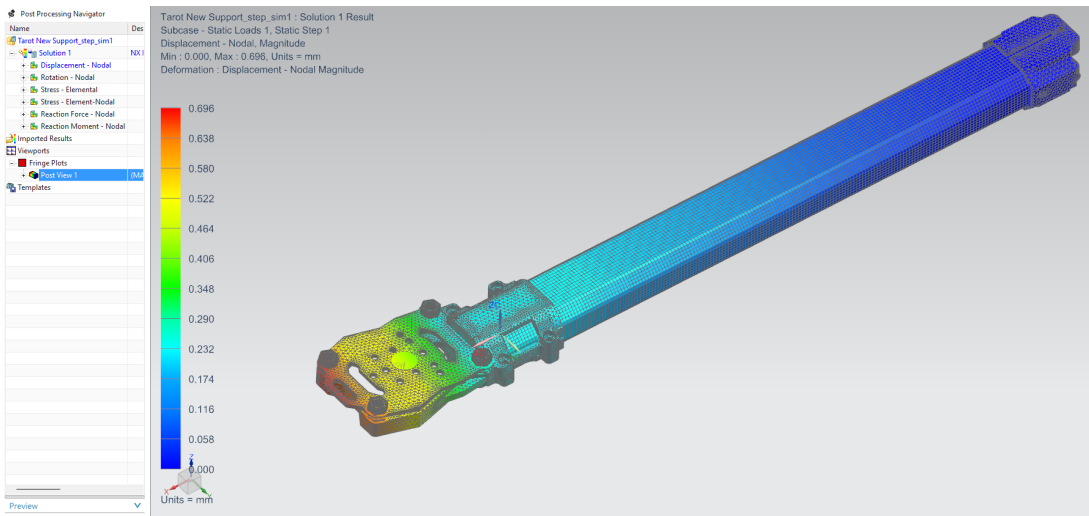


Figura 4.2.6: Desplazamientos nodales del brazo modificado, elaboración propia.

Interpretación: El diseño modificado presenta una rigidez a la flexión significativamente menor, posiblemente debido al nuevo perfil o a la geometría del soporte del motor. La aceptabilidad de esta disminución depende de las tolerancias de vibración y los requisitos dinámicos de la plataforma de vuelo.

4.2.3. Resistencia Estructural (Esfuerzos de Von Mises)

- **Brazo Original:** esfuerzo máximo de 28.99 MPa localizado en el tubo.

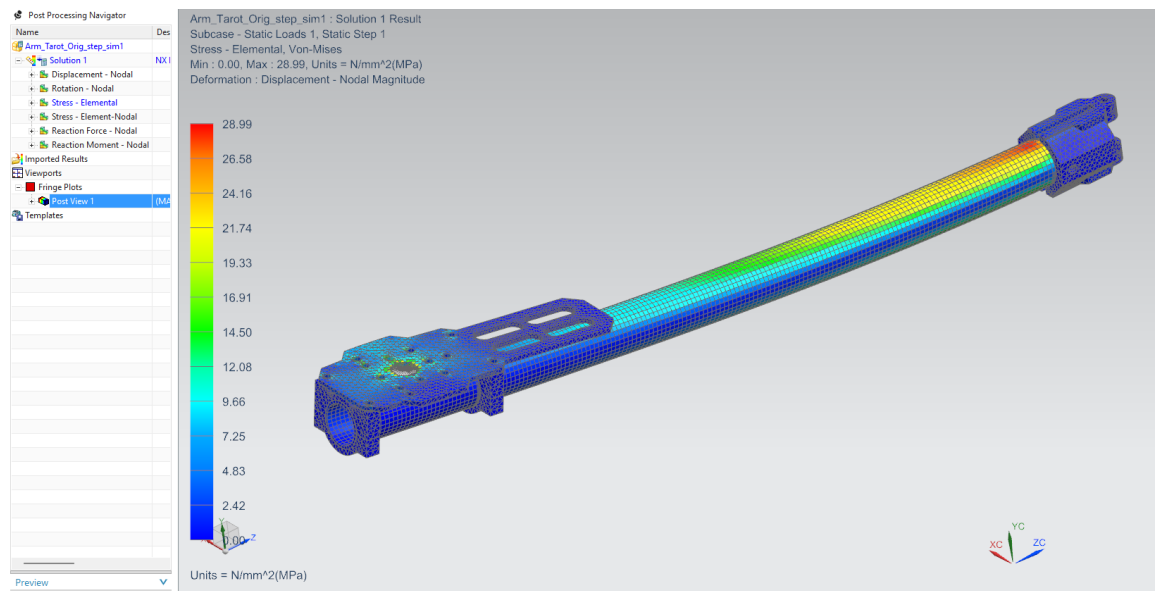


Figura 4.2.7: Distribución de esfuerzos de von Mises en el brazo original, elaboración propia

- **Brazo Modificado:** esfuerzo máximo de 37.13 MPa (+28.1%), trasladado a la nueva base.

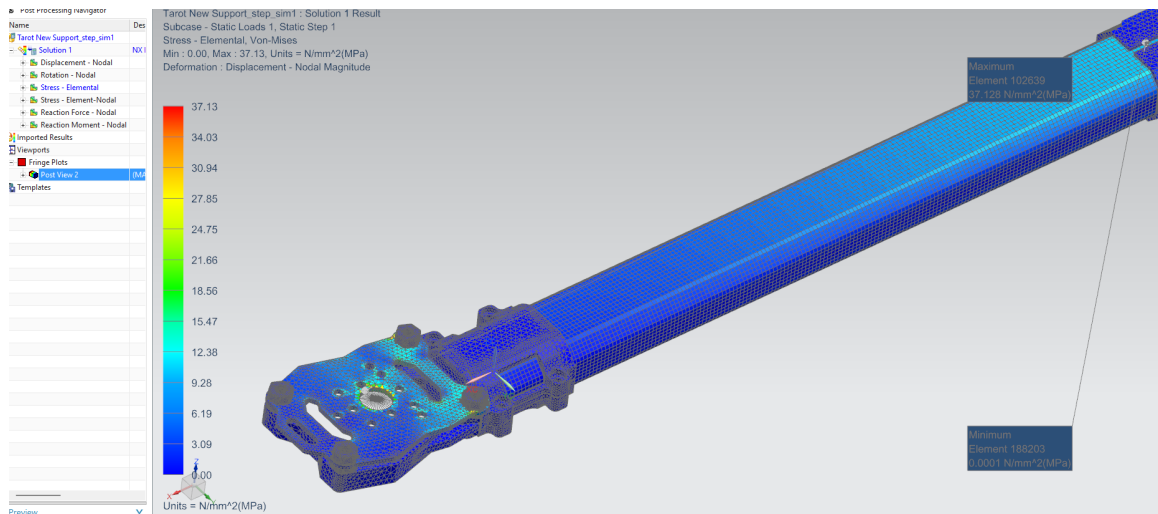


Figura 4.2.8: Distribución de esfuerzos de von Mises en el brazo modificado, elaboración propia

Interpretación: El rediseño introduce una nueva zona crítica donde se concentran los esfuerzos. Aunque 37.13 MPa puede encontrarse por debajo de los límites admisibles para aluminio o fibra de carbono, este punto débil no estaba presente en el diseño original y debe considerarse en el análisis de resistencia a fatiga y durabilidad.

Capítulo 5

Discusión

5.1. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos permiten comparar con claridad el comportamiento estructural del brazo original frente al brazo modificado. En términos generales, el rediseño cumple su objetivo principal: eliminar el modo de falla por deslizamiento torsional y mejorar la confiabilidad del sistema. Sin embargo, este avance implica varios compromisos que deben analizarse con detalle.

En primer lugar, los análisis de esfuerzos muestran que el brazo modificado redistribuye la carga torsional de manera distinta al diseño original. Aunque el bloqueo mecánico evita el desgaste progresivo, introduce una nueva concentración de esfuerzos en la base del brazo. Este punto crítico, no presente en la versión inicial, sugiere que el rediseño genera un camino de carga más rígido, pero también más localizado, que debe refinarse para evitar posibles fallas prematuras.

Por otro lado, los desplazamientos nodales revelan una pérdida significativa de rigidez, tanto torsional como flexional, en el brazo modificado. La rotación cercana al medio grado y el incremento del desplazamiento máximo indican que el componente ahora presenta un comportamiento más elástico. Si bien este efecto no compromete de inmediato la integridad estructural, sí podría afectar la dinámica de vuelo del dron, generando retrasos en la respuesta o inestabilidad ligera en maniobras rápidas.

En contraste, el brazo original presenta un mejor desempeño estático, con menor deformación y mayor rigidez, pero su punto débil sigue siendo el sistema de sujeción,

donde aparece el deslizamiento por torsión que motivó el rediseño. Esto evidencia que la prioridad del proyecto—eliminar la falla mecánica recurrente—sí se logró, aunque a costa de sacrificar parte del desempeño estructural.

En conjunto, los resultados muestran que el rediseño va en la dirección correcta pero requiere ajustes adicionales. El desafío consiste en mantener el bloqueo mecánico, que es funcional y robusto, mientras se incrementa nuevamente la rigidez torsional y se mitiga la concentración de esfuerzos en la base. Una optimización geométrica del perfil del brazo, el aumento del espesor de pared o la incorporación de refuerzos locales podrían equilibrar estos factores para la siguiente iteración del diseño.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

El *Brazo Modificado* muestra un claro equilibrio entre ventajas y desventajas desde el punto de vista de ingeniería:

- **Soluciona el problema principal:** El nuevo sistema elimina el desgaste y el deslizamiento por torsión presentes en el diseño original gracias a un bloqueo mecánico más seguro. Esto mejora notablemente la fiabilidad y la seguridad del dron.
- **Genera nuevos retos:** Aunque resuelve la falla crítica, también introduce varios efectos no deseados:
 - *Menor rigidez torsional:* La rotación cercana a 0.5° es elevada y podría afectar la respuesta del dron, generando un pequeño retraso o “torsión flexible”.
 - *Menor rigidez a la flexión:* El brazo resulta aproximadamente un 53 % más flexible que el original.
 - *Nueva zona crítica de esfuerzos:* Aparece una concentración de tensiones importante en la base del brazo.

6.2. Recomendaciones

El concepto del bloqueo mecánico es adecuado y debe conservarse, pero el diseño necesita una segunda iteración de mejora:

- **Mejorar la base del brazo:** Es necesario reducir la concentración de esfuerzos (37.13 MPa). Esto puede lograrse aumentando los radios de filete en las esquinas o añadiendo material donde sea necesario.
- **Recuperar la rigidez torsional:** La rotación de 0.456° debe disminuirse. Se recomienda revisar el perfil del brazo, aumentar el espesor de pared o añadir refuerzos internos para mejorar la inercia polar sin perder el sistema de bloqueo.
- **Revisar la rigidez a la flexión:** Se debe confirmar si el desplazamiento de 0.696 mm es aceptable. Si no lo es, las mismas mejoras en el perfil (mayor espesor o refuerzos) ayudarán a corregir este aspecto.

Bibliografía

- Ansys (2024). Sitio web oficial de ansys.
- Autodesk (2024). Fusion 360 overview.
- Bathe, K.-J. (2006). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 2nd edition.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., and Mazurek, D. F. (2012). *Mecánica de Materiales*. McGraw-Hill.
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2020). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales: Una Introducción*. John Wiley & Sons, 10^a edition.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., and Witt, R. J. (2001). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons, 4th edition.
- Fernandez-Peña, D. A. (2023). Dron en impresión 3D. *Let. Concienc. Tecnol.*, (21).
- Gómez González, S. (2016). *El Gran Libro de SolidWorks Simulation*. Marcombo, 1 edition.
- Logan, D. L. (2011). *A First Course in the Finite Element Method*. Cengage Learning, 5th edition.
- Pappalardo, C. M., Del Giudice, M., Oliva, E. B., Stieven, L., and Naddeo, A. (2023). Computer-Aided Design, Multibody Dynamic Modeling, and Motion Control Analysis of a Quadcopter System for Delivery Applications. *Machines*, 11(4):464.
- Reddy, J. N. (2019). *An Introduction to the Finite Element Method*. McGraw-Hill Education, 4th edition.
- Siemens (2024). Nx for design & manufacturing.
- Systèmes, D. (2024). Solidworks user guide.
- Urdea, M. (2021). Stress and vibration analysis of a drone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1009(1):012059.
- Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method*. Butterworth-Heinemann, 5th edition.