



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

# DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN PARA PLATAFORMAS DE UN DRON MULTIRRITOR

I N G E N I E R Í A   M E C Á N I C A

Curso 2015-2016

Tutor: Federico Martin de la Escalera

Rafael Camacho Puig



<b>OBJETIVO</b> .....	<b>4</b>
METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	4

## Parte Primera

<b>CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
1.1 TIPO DE DRONES. ....	7
<b>CAPITULO 2 DRON MULTIRROTOR</b> .....	<b>8</b>
2.1 FUNCIONAMIENTO.....	8
2.2 PARTES DE UN DRON MULTIRROTOR .....	10
2.3 TIPOS DE MULTIRROTOR.....	12
<b>CAPITULO 3 ESTADO DEL ARTE.</b> .....	<b>14</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	14
3.2 EJEMPLOS DE MERCADO.....	14

## Parte Segunda

<b>CAPITULO 4 MATERIAL</b> .....	<b>18</b>
4.1 MATERIALES DISPONIBLES EN EL MERCADO .....	18
4.2 MATERIAL ELEGIDO .....	20
<b>CAPITULO 5 PROCESO DE FABRICACIÓN.</b> .....	<b>21</b>
5.1. INTRODUCCIÓN A LA IMPRESIÓN 3D. ....	21
5.2 IMPRESIÓN 3D APLICADA A DRONES.....	23
5.3 IMPRESIÓN DE ESTRUCTURAS PARA DRONES .....	24
5.4 PROCESO DE FABRICACIÓN ELEGIDO .....	26
5.4.1 Introducción. ....	26
5.4.2 Consideraciones del diseño.....	26
5.4.3 Resolución y precisión .....	27
5.4.4 Geometrías imprimibles.....	28
<b>CAPITULO 6 DISEÑO.</b> .....	<b>30</b>
6.1 PROGRAMAS UTILIZADOS .....	30
6.1.2 Método de elementos finitos.....	30
6.2 DISEÑO DEL BRAZO. ....	35
6.2.1 Diseño inicial .....	35
6.2.3 Diseño a partir de la optimización. ....	43
6.2.4 Resultados obtenidos.....	47
6.3 CUERPO CENTRAL.....	49



6.4 TREN DE ATERRIZAJE .....	53
6.5 ACCESORIOS .....	56
6.5.1 Placa .....	56
6.5.2 Soportes .....	58
6.6 ENSAMBLAJE .....	62
<b>CAPITULO 7 MOTOR.....</b>	<b>67</b>
7.1 EL MOTOR BRUSHLESS .....	67
7.2 ASPECTOS TÉCNICOS DE LOS MOTORES .....	68
7.3 HÉLICES.....	69
7.4 SELECCIÓN DE MOTOR Y HÉLICES .....	70
<b>CAPITULO 8 UNIONES. ....</b>	<b>72</b>
<b>CAPITULO 9 SIMULACIÓN DE VUELO. ....</b>	<b>77</b>
<b>CAPITULO 10 CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....</b>	<b>79</b>

## Parte Tercera

<b>CAPITULO 11 ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>82</b>
11.1 PRESUPUESTO DE DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	82
11.2 PRESUPUESTO DE COMPONENTES .....	83
11.3 PRESUPUESTO TOTAL.....	83
<b>ANEXO .....</b>	<b>85</b>
1. Índice de figuras.....	86
2. Índice de tablas .....	88
3. Bibliografía.....	89
4. Bibliografía de imágenes.....	91
5. Bibliografía de tablas .....	93

## OBJETIVO

**El objeto principal del proyecto es el diseño y la optimización de la estructura de un dron disminuyendo su peso para aumentar el tiempo de vuelo o la carga de pago.**

Este proyecto se centra en el diseño y optimización de la estructura de un dron multirroto fabricado mediante impresión 3D.

El dron será del tipo hexacóptero y tendrá la capacidad de mantener en el aire una carga de 6kg en régimen estacionario.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

Una vez establecido el objetivo se deben identificar las condiciones que influirán en el diseño:

- Material
- Proceso de fabricación.
- Condiciones de vuelo.

Tras evaluar estas condiciones se puede realizar un primer prototipo del dron, el cual realizará un proceso iterativo.

El proceso iterativo consiste en un análisis estructural aplicando las condiciones de servicio en vuelo, una optimización cuyo objetivo es conservar la energía de deformación minimizando el peso de la estructura, dando lugar al diseño de un nuevo prototipo

Este proceso iterativo se repetirá hasta obtener unos resultados que permitan cumplir el objetivo con un peso mínimo.

Una vez terminada la fase de diseño se procederá a la fabricación del dron.

Se presenta a continuación un esquema de la metodología de trabajo.



Figura 1: Diagrama de flujo metodología de trabajo.

# Parte Primera

---

## CAPITULO 1.

## INTRODUCCIÓN

Un dron es un vehículo aéreo no tripulado por personas que puede ser controlados por control remoto o incluso controlarse ellos mismos mediante un software.



*Figura 2: Dron multirrotor [1]*

## 1.1 TIPO DE DRONES.

Existe una amplia variedad de formas, tamaños, configuraciones y características de los drones. Se pueden clasificar en función de diferentes aspectos:

### Tipos de alas:

- Drones de alas fijas: Tienen las alas fijas de forma similar a los aviones.
- Drones multirrotor: Funcionan de manera similar a un helicóptero pero cuentan con varios motores (entre 4 y 8) formando pares de hélices que giran en sentidos contrarios. De esta manera logran mantener la estabilidad creando la fuerza de empuje necesaria para elevar el dron.

### Método de pilotaje:

- Autónomo: El dron se guía por sus propios sistemas y sensores integrados.
- Monitorizado: El dron dirige su plan de vuelo junto con un técnico, que no tiene el control pero puede decidir qué acción llevar a cabo.
- Supervisado: Un operador pilota el dron, que puede realizar tareas de forma autónoma.
- Preprogramado: El dron sigue un plan de vuelo establecido y no tiene medios para cambiarlo.
- Control remoto: El dron es pilotado por un operador mediante una consola.

### Aplicación final:

- Militar: Actúan como vehículos de combate aéreo y reconocimiento, pueden ir armados y con capacidad de bombardeos.
- Civil: Tienen uso no militar y se pueden emplear para fotografía, ocio, reconocimiento o rescate.

## CAPITULO 2.

# DRON MULTIRROTOR

Un dron multirrotor es un tipo de dron también llamado helicóptero multirrotor, el cual es levantado y propulsado por dos o más rotores.

Los multirrotores se clasifican como helicópteros, a diferencia de las aeronaves de ala fija, debido a que su elevación es generada por pares de hélices orientadas verticalmente.

Debido a su fácil construcción y control existen muchos tipos de multirrotor pero los más comunes son los cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros para referirse a drones de 4, 6 y 8 rotores respectivamente.

### 2.1 FUNCIONAMIENTO

El dron multirrotor está compuesto por varios rotores que serán los encargados de aportar la sustentación necesaria para que el dron pueda elevarse. Las características principales de un dron multirrotor son la posición simétrica de sus rotores y su rotación asimétrica dos a dos, lo que permite equilibrarse a sí mismo utilizando la misma rotación en los 4 motores.

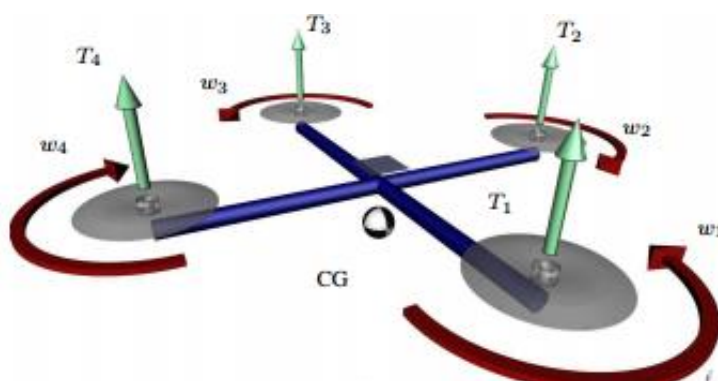


Figura 3: Disposición dron multirrotor [2]



Por lo tanto, los pares generados por los rotores 1 y 3 serán de sentido contrario a los pares de los rotores 2 y 4, siempre que los empujes generados sean de la misma magnitud.

Utilizando diferentes configuraciones en los motores se pueden obtener movimientos que permiten el control del dron para manejarlo en función de sus aplicaciones. El control de altitud se logra modificando el empuje base de todos los motores consiguiendo que el dron pueda subir de altura, estabilizarse en un punto fijo y disminuir la altura.

En términos aeronáuticos las rotaciones de una aeronave según sus ejes reciben los nombres de Roll , Pitch y Yaw y se representan en la siguiente figura:

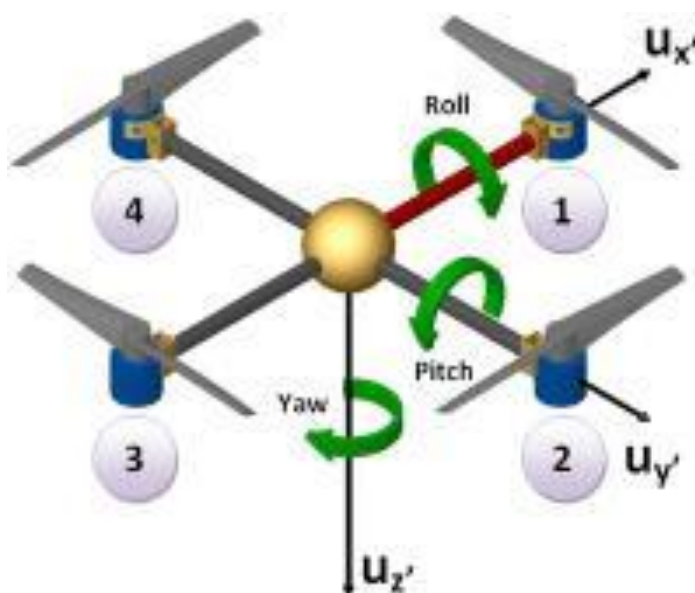


Figura 4: Rotaciones dron multirrotor [3]

Para controlar el movimiento de **Roll** se debe modificar el empuje de los motores 2 y 4 aumentándose en uno y disminuyéndose la misma cantidad en el otro. De esta manera se crea una rotación sobre el eje X en el sentido marcado por el motor de mayor empuje.

El movimiento de **Pitch** se realiza de la misma manera que el movimiento de Roll pero variando el empuje de los motores 1 y 3 del mismo modo y en función del sentido deseado.

Para controlar el movimiento de **Yaw** se debe aumentar la potencia de dos motores opuestos mientras que los otros dos se mantienen estables.

Debido a la disposición asimétrica de los sentidos de giro de los motores, se obtendrá un aumento de empuje en ellos con el mismo sentido del giro de la hélice, dando lugar a una rotación del dron sobre sí mismo. El sentido de la rotación del dron dependerá de la rotación de la hélice de los motores con mayor empuje.

## 2.2 PARTES DE UN DRON MULTIRROTOR

La estabilidad de un dron multirrotor se consigue gracias a un sistema tecnológico dividido en diferentes elementos. Las partes en las que se puede dividir un dron dependen de su aplicación final pero existe un conjunto mínimo de elementos en común que todo dron necesita para su correcto funcionamiento:

### **La estructura.**

Es el esqueleto del multirrotor, le da forma y es donde se instalarán otras piezas u accesorios. Puede dividirse en tres partes comunes para todos los drones multirrotor.

### **Brazo.**

Es la parte que soporta el peso del motor y lo conecta al cuerpo central. Cuanto más alejado este el motor, más grandes podrán ser las hélices, proporcionando mayor sustentación y mayores esfuerzos sobre el brazo.

### **Tren de aterrizaje.**

Es la parte encargada de soportar la estructura del dron además de absorber las vibraciones durante el despegue y aterrizaje. La mayoría suelen ser trenes de aterrizajes fijos.

### **Cuerpo central.**

Es la parte central del dron que une todos los brazos y el tren de aterrizaje. En ella se suelen fijar los accesorios para objetivos concretos además de ser el lugar donde asegurar las baterías y otros elementos no estructurales.

### **Motores, hélices y controladores de velocidad.**

Son las partes que se encargan de mantener el dron en el aire. Los controladores de velocidad regulan la potencia eléctrica para lograr el giro de los motores de forma ágil y eficiente. Los motores están conectados a las hélices, cuya rotación genera una sustentación que depende de su tamaño y su velocidad de giro.

### **Baterías.**

Proporcionan la energía necesaria para hacer funcionar el equipo. Las más utilizadas son las baterías tipo Li-Po (polímero de litio) debido a su densidad de

energía, su alta tasa de descarga y su bajo peso que las hace perfectas para maniobras ágiles y rápidas como las de los drones multirrotores.

### Controlador de vuelo.

Es el cerebro del dron. Controla mediante sensores todo lo que sucede y es a donde van conectados la mayoría de los componentes.

### Radio receptor.

Recibe la señal de radio enviada desde el control remoto por parte del usuario. A continuación transformará los datos de manera que el controlador de vuelo pueda interpretarlos y ejecutar las señales mediante cambios de velocidad en los motores de forma coordinada.

### Accesorios.

Debido a las necesidades que se han ido creando, los drones han sido equipados con accesorios y elementos que mejoran aún más sus prestaciones como pueden ser cámaras en tiempo real, estabilizadores, brújulas y control por GPS.

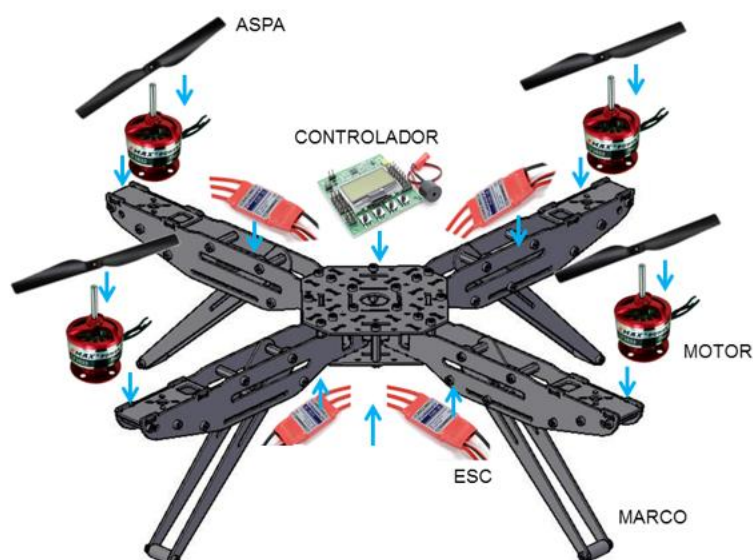


Figura 5: Partes de un dron multirrotores [4]

## 2.3 TIPOS DE MULTIRROTOR

Entre los multirrotores más utilizados se encuentran los cuadricópteros, los hexacópteros y los octocópteros:

### **Cuadricópteros:**

Es el multirrotor más popular con diferencia, son rápidos, baratos, fáciles de manejar y fabricar, y además tienen un precio muy asequible.

Esta configuración puede utilizar una disposición cuadrada o rectangular de los motores y son lo suficientemente potentes como para elevar pequeñas cargas o incorporar accesorios.

Por su tamaño sería el dron recomendado para actividades de interior, desplazamientos de corta distancia y transporte de cargas ligeras.

### **Hexacópteros:**

Es el siguiente escalón después del cuadricóptero. Al tener seis motores con sus respectivas hélices debe tener una envergadura mayor y por lo tanto, mejores prestaciones.

Debido a los motores adicionales consigue mayor potencia llegando a mayores velocidades y alcanzando mayor altura que un dron de 4 motores. El hecho de tener dos motores más, también influye en la seguridad dado que un cuadricóptero caería súbitamente al suelo por un fallo de motor, y el hexacóptero tendría capacidad de maniobra suficiente para realizar un aterrizaje forzoso evitando posibles peligros.

El hexacóptero es un buen compromiso entre rendimiento y precio, transportando de manera más segura un equipamiento caro para trabajos específicos. Tiene dificultades para volar en espacios reducidos pero puede soportar mayor carga útil, y tienen un precio superior a los cuadricópteros al igual que sus recambios.

### Octocópteros:

Este tipo de multirrotor ofrece prestaciones superiores en cuanto a potencia, estabilidad, velocidad y seguridad respecto a un hexacóptero, pero la relación entre el precio y su tiempo de vuelo no es tan buena.

Los precios y el mantenimiento son muy elevados, por ello, se recomienda su uso para trabajos específicos que requieran alta estabilidad en cualquier condición y peso de carga de pago elevado.



*Figura 6: Tipos de dron multirrotor [5]*

## CAPITULO 3.

# ESTADO DEL ARTE.

En este capítulo se va a evaluar la situación de los hexacópteros en el mercado, sus aplicaciones y sus características.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los hexacópteros se utilizan para fines relacionados con la toma de imágenes o videos aunque pueden ser utilizados como repetidores de señal o transportar alguna carga puntual.

El precio de un hexacóptero semi-profesional puede rondar entre los 800 € y los 3000€ dependiendo de sus características. Los tiempos de vuelo se encuentran en un rango de 10 a 25 minutos de vuelo estacionario sin carga y el peso medio varía entre 3kg y 5kg.

### 3.2 EJEMPLOS DE MERCADO.

#### **Align M690L Hexacopter Súper Combo RM69001XW**

Se trata de un dron hexacóptero con una capacidad de vuelo de hasta 14 minutos con un peso de 3.4kg. Es un dron cuya finalidad está relacionada con el ámbito de la toma de imágenes y videos.

Sus características son las siguientes:

- Diámetro Airframe: 900mm.
- Altura: 446mm.
- Principal Longitud de la lámina: 179mm.
- Diámetro del rotor principal: 391mm.
- Volando Peso (sin batería): 3400g.
- Dispositivo Bluetooth.
- 7 pulgadas de carbono del rotor principalx6 sets.
- 5,000~12,000mAh Li-Polymer Batería 6S.
- G3 3 Ejes Gimbal.
- OSD+Transmisor de video FPV.
- FPV Monitor.

Su precio es de 1770 €.

Peso	3400g	Rango de corriente de carga 1KG	26.9A
Despegue Peso	4300g	Rango de corriente de carga 2KG	35A
Hover Poder Currency	20A	Rango de corriente de carga 3KG	44A

Especificaciones y Equipos	Diámetro Airframe	900mm
	Principal Longitud de la lámina	179mm
	Diámetro del rotor principal	391mm
	Altura	446mm
	Volando Peso (sin batería)	Approx. 3400g
Unidad de Control de Multicopter APS-M	Voltaje de entrada	DC4.5V~8.4V
	Consumo de corriente	<250mA@ 4.8V
	Frecuencia de funcionamiento	400Hz
	Temperatura de funcionamiento	-20° ~ 65°C(-4° ~ 149 °F)
	Hovering Precisión (Dependiendo de Estado de satélites)	Horizontal ±1m(3.28ft) Vertical ±1m(3.28ft)
	Mayor velocidad de vuelo	Horizontal 15m/sec Vertical 6m/sec
	Restricción Máxima Altitud	700m(1640ft) por encima del punto de despegue
	Velocidad máxima Angular	Aileron/Elevator 115° /sec, Rudder 145° /sec
	Máximo ángulo de inclinación	30 grados
	Soporta periféricos externos	G2 / G3 Gimbal, OSD+FPV Video transmisor
Unidad de Control de Potencia PCU	Soporta MultiCopter Configuraciones	4 rotors +, 4 rotors X, 6 rotors +, 6 rotors X 8 rotors +, 8 rotors X.
	Dimensión	49x34.3x20mm
	Voltaje de entrada	13.2V~25.2V (4S~6S Li-Po)
	Frecuencia de funcionamiento	500KHz
Motor ESC	Dimensión	62x35x26mm
	Voltaje de entrada	13.2V~25.2V (4S~6S Li-Po)
	Max Corriente Continua	40A
BL4213 Motor 370KV(RPM/V)	Dimensión	74.2x27x12.7mm
	Voltaje de entrada	DC 22.2V
	Max Corriente Continua	25A
	Max Potencia continua	550W
	Armas del estator	12
	Imán polacos	14
	Dimensiones / Peso	Φ4xΦ52x33mm / 185g

Figura 7: Especificaciones técnicas Align M690L.[6]



Figura 8:Align M690L[7]

## DJI S900

Al igual que el dron Walkera TALI H500 , su función es tomar imágenes desde el aire. Es un tipo de dron portátil y fácil de transportar. Tiene un tiempo de vuelo estimado de 18 minutos y pesa 3.3kg.

Cuenta con las siguientes características:

- Ligero, fuerte y estable.
- Altamente portátil, fácil de llevar.
- Nuevo sistema de distribución de energía.
- Extraíble Junta Centro Superior.
- Antichispa Plug.
- Calidad Profesional.
- Amplia gama de ángulos de disparo.
- Tren de aterrizaje retráctil.
- Compatible con Zenmuse Gimbals.
- Reducción de las vibraciones, metraje más clara.
- Mayor potencia.
- Diseño innovador Arm.

Su precio es de 2.785,09€



Figura 9:DJI S900[9]



Frame	Distancia entre ejes Diagonal	900mm
	Marco de Brazo Largo	358mm
	Marco de Brazo Peso (Incluyendo el motor, ESC, Hélice)	316g
	Frame Center Diámetro	272mm
	Frame Center Peso (con tren de aterrizaje Base de montaje, Servos)	1185g
	Tren de aterrizaje Tamaño	460mm (largo) x 450 mm (ancho) x 360 mm (Altura)
Motor	Estator Tamaño	41x14mm
	KV	400rpm/V
	Máxima potencia	500W
	Peso (con ventilador de refrigeración)	158g
ESC	Voltaje de funcionamiento	40A
	Working Voltage	6S LiPo
	Frecuencia de la Señal	30Hz ~ 450Hz
	Drive Frecuencia PWM	8KHz
	Peso(con radiadores)	35g
Hélice plegable (1552/1552R)	Material	Alta resistencia de rendimiento de ingeniería de plásticos
	Tamaño	15x5.2inch
	Peso	13g
Parámetros de vuelos	Quitese Peso	4.7Kg ~ 8.2Kg
	Peso total	3.3Kg
	Energía de la batería	LiPo (6S \ 10000mAh~15000mAh \ 15C(Min))
	Carga máxima admisible	3000W
	Hover Consumo de energía	1000W (@6.8Kg Quitese Peso)
	Hover Tiempo	18min (@12000mAh& 6.8Kg peso de despegue)
	Ambiente Temperatura de trabajo	-10 °C ~ +40 °C

Figura 10: Especificaciones técnicas DJI S900[8]

---

# Parte Segunda

---

## CAPITULO 4.

# MATERIAL

En este capítulo se comentarán los materiales más utilizados para la construcción de drones y el material elegido.

### 4.1 MATERIALES DISPONIBLES EN EL MERCADO

Los materiales más utilizados para las estructuras y componentes de los drones son: plásticos como ABS y nylon, metales con aluminio, y materiales compuestos como fibra de vidrio o fibra de carbono.

La estructura del dron está diseñada para fabricarse al completo mediante impresoras 3D. Dentro de la tecnología de impresión 3D, los materiales más comunes son los termoplásticos ABS y PLA.

**ABS:** Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

Al extruirse produce gases generalmente tolerables. Es un material bastante versátil: permite lijarse, pulirse con baño de acetona, realizar acabados lisos, pegar con facilidad y pintar sobre él.

**PLA:** Ácido poliláctico.

Es un plástico biodegradable procedente del maíz o patata. Además de ser reciclable, es posible su reutilización después de un proceso adecuado. Permite impresiones más rápidas que el ABS y no emite gases perjudiciales al salir del extrusor.

A parte de estos 2 materiales básicos, existen más materiales con características especiales aplicables a drones mediante impresoras 3D:

- Soft PLA: Permite imprimir objetos flexibles.
- Nylon: Alternativa a ABS y PLA, más resistente y flexible.
- Bendlay: Flexible como Soft PLA y transparente.
- Fluorescentes: Aumentan la visibilidad del objeto.
- Materiales conductores de electricidad.

En el mercado existen ya materiales reforzados con polvo de fibra de carbono que se puede usar en impresoras 3D de tecnología FDM. Son materiales termoplásticos reforzados con un 15% en peso de fibra de carbono que aumenta en un 30% la rigidez a tracción.

En la tabla se comparan las propiedades de los materiales disponibles para impresión 3D mediante tecnología FDM, tanto materiales convencionales como reforzados. Se puede observar que el material de fibra de carbono es hasta 20 veces más rígido y más resistente que un termoplástico sin reforzar.

*Tabla 1: Comparación de materiales [1]*

	<b>ABS-M30</b>	<b>PLA</b>	<b>ULTEM® 1010</b>	<b>Nylon FFF</b>	<b>Carbon Fiber CFF</b>	<b>Kevlar CFF</b>	<b>Fiberglass CFF</b>
<b>Resistencia a tracción (MPa)</b>	31	45	64	56	700	610	590
<b>Módulo elástico (GPa)</b>	2.23	3.3	2.77	0.38	50	26	20
<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	60	110	144	-	470	190	310
<b>Módulo a flexión (GPa)</b>	2.06	3.2	2.82	0.4	48	24	21

Los materiales compuestos ofrecen la posibilidad de integrar diferentes componentes en una sola pieza, prescindiendo de uniones atornilladas o remachadas aligerando la estructura final.

De esta forma, estos materiales avanzados ofrecen la ventaja de la alta resistencia y bajo peso de los materiales compuestos, unidos a las ventajas de la impresión 3D.

## 4.2 MATERIAL ELEGIDO

El material plástico ABS-M30 es el más utilizado en los sistemas de impresión FDM además de ser el más barato en la gama de los termoplásticos, por lo tanto, es la opción ideal para modelos de concepto y piezas con requisitos moderados incluidos prototipos funcionales, plantillas, troqueles, herramientas de fabricación y piezas para uso final.

El ABS se puede mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar y pegar con extrema facilidad. El acabado sigue siendo bueno además de ser extremadamente resistente.

Actualmente el PLA tiene dos ventajas principales sobre el ABS: no emite gases nocivos y hay un rango más amplio de colores. Además se puede imprimir con todo tipo de impresoras y no necesita base de impresión caliente.

Sin embargo algunos problemas que presenta el PLA y que hacen que no sea un material en condiciones para las estructuras de drones son la descomposición a partir de 50-60 grados centígrados y el postproceso (realizar operaciones como mecanizar, pintar y pegar es mucho más complicado).

Por tanto, finalmente **el material elegido para la fabricación del dron será el plástico ABS**, en concreto el material ABS M-30 ya que presenta mejores propiedades que el PLA y el problema de los gases puede ser resuelto mediante la ventilación de la sala de impresión.

Sus propiedades se muestran a continuación:

*Tabla 2: Propiedades mecánicas ABS-M30 [2]*

Propiedades Mecánicas	Método de Test	Valor
Tensión de Rotura (Tipo 1, 0.125", 0.2" / min)	ASTM D638	36 MPa
Módulo Elástico (Tipo 1, 0.125", 0.2" / min)	ASTM D638	2,400 Mpa
Límite Elástico (Tipo 1, 0.125", 0.2" / min)	ASTM D638	26 Mpa
Tensión de Deformación (Tipo 1, 0.125", 0.2" / min)	ASTM D638	4%
Resistencia a la Flexión (Método 1, 0.05"/min)	ASTM D790	61 Mpa
Módulo de Flexión (Método 1, 0.05"/min)	ASTM D791	2,300 Mpa
Ensayo de IZOD, notched (Método A, 23°C)	ASTM D256	193 J/m
Ensayo de IZOD, un-notched (Método A, 23°C)	ASTM D257	283 J/m
Densidad		1040 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson		0,33

## CAPITULO 5.

# PROCESO DE FABRICACIÓN.

Los drones del tipo multirrotores tienen muchas partes susceptibles de ser optimizadas, aumentando su resistencia y reduciendo su peso a través de la tecnología de impresión 3D.

Unas de las partes que más se pueden aprovechar de la optimización mediante la impresión 3D son los brazos que soportan el peso de los motores del dron.

### 5.1. INTRODUCCIÓN A LA IMPRESIÓN 3D.

Las impresoras y los drones 3D están en plena evolución y crecimiento, tanto en su desarrollo tecnológico como en la aparición de nuevas funciones y aplicaciones.

La impresión 3D y su tecnología ALM (additive layer manufacturing) están adquiriendo cada vez más relevancia en nuestras vidas, evolucionando enormemente en los últimos años gracias al constante desarrollo de nuevo hardware, software y materiales. Su creciente popularidad ha permitido a día de hoy que muchas empresas tengan acceso directo a la impresión 3D, aportando nuevas soluciones de diseño y fabricación impensables hace años.

Existen principalmente tres tipos de tecnologías de impresión 3D:

#### 1. Esterolitografía(SLA)

Fue el primer método concebido. Consiste en la aplicación de un láser ultravioleta a una resina líquida sensible a la luz contenida en un recipiente. La luz ultravioleta va solidificando la resina en capas hasta que el objeto adquiere la forma deseada.

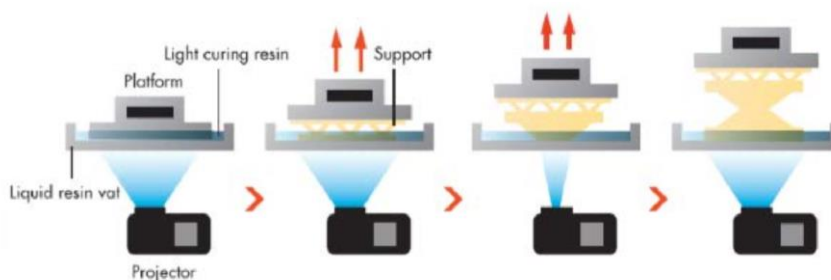


Figura 11: Proceso de esterolitografía [12]

## 2. Sinterización selectiva por láser(SLS)

Este método permite utilizar materiales en polvo sobre el cual un láser impacta fundiendo el material de forma selectiva siendo solidificado de la forma deseada.

A medida que se va formando las piezas por capas, un sistema de abastecimiento de material suministra el polvo necesario para la impresión.

El material que no sea utilizado durante la impresión se almacena en el mismo lugar donde se inició, por lo que no hay desperdicio de material.

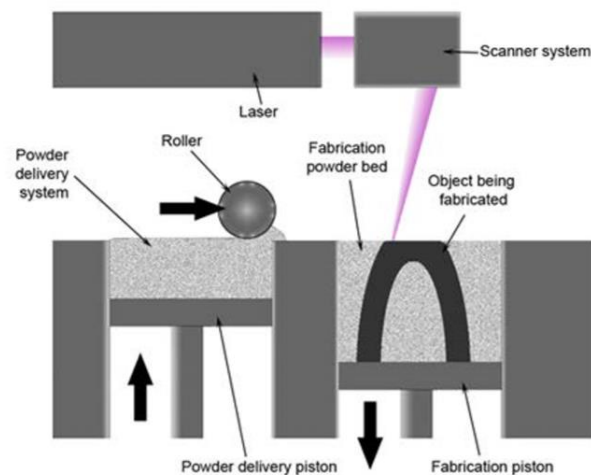


Figura 12: Proceso de sinterización selectiva por láser.[13]

## 3. Deposición por material fundido (FDM)

Consiste en depositar polímero fundido sobre una base plana, capa a capa. Se parte de un filamento de plástico que se funde y es expulsado por la boquilla de extrusión como un hilo que se va solidificando conforme a su depositado.

Se trata de la técnica más común en cuanto a impresoras 3D de escritorio y usuarios domésticos. La ventaja principal de esta tecnología es su bajo coste, lo que permite el alcance de esta tecnología a cualquier persona.

La tecnología FDM permite reforzar el filamento termoplástico con fibra de vidrio, kevlar o carbono, tanto con fibra corta o en polvo como con fibra larga continua. Este último tipo de refuerzo permite imprimir piezas de hasta 20 veces más resistencia que los filamentos sin reforzar, siendo un proceso más caro y complejo.

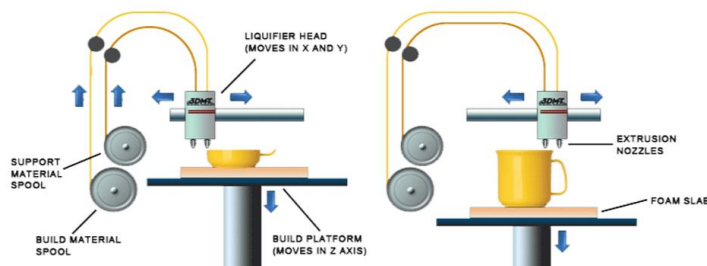


Figura 13: Proceso de deposición por material fundido [14]

Por otro lado, y al igual que las impresoras 3D, los drones se encuentran en pleno apogeo. Aunque inicialmente esta denominación se refería a vehículos militares no tripulados, gracias a la miniaturización y disminución de costes de fabricación, los drones han irrumpido numerosas áreas de especialización.

El desarrollo de la tecnología de impresión 3D permite la aplicación directa en la fabricación de drones, especialmente en los del tipo multirrotor, los cuales tienen diseño y estructuras idóneas para ser optimizadas mediante impresión 3D.

## 5.2 IMPRESIÓN 3D APLICADA A DRONES.

Dentro de los diferentes tipos de impresoras, las de tecnología FDM son las más extendidas tanto comercialmente como a nivel usuario, debido a su bajo coste y facilidad de uso. Este tipo de impresoras son ideales para mejorar y optimizar el diseño de drones tipo multirrotor aportando ventajas sobre fabricación o mecanizado de materiales o la inyección de plásticos.

Algunas de las ventajas más significativas son las siguientes:

### **Prototipado rápido.**

Permite la fabricación rápida de modelos físicos, pudiendo validar de forma eficaz el ajuste, la forma, diseño, errores y mejores productos finales.

### **Reducción de costes de fabricación.**

La impresión 3D no requiere ningún tipo de utillaje, eliminando de esta manera ese coste asociado. Además, la tecnología 3D permite hacer diseños personalizados en función de los requerimientos y la fabricación de accesorios según la aplicación final.

Por tanto la tecnología 3D reduce costes de fabricación en utillaje, material y en tiempos globales de fabricación para piezas en series cortas.

### Personalización a bajo coste.

La impresión 3D permite hacer diseños personalizados en función de los requerimientos y la fabricación de accesorios según la aplicación final del dron.

En caso de rotura de alguna pieza, la impresión 3D permite la fabricación acorde a las necesidades de la reparación o reposición reduciendo también el tiempo de entrega.

## 5.3 IMPRESIÓN DE ESTRUCTURAS PARA DRONES

Unas de las partes que más se pueden aprovechar de la optimización mediante la impresión 3D son los brazos que soportan el peso pudiendo variar entre 4 y 8 el número de motores del dron.

La estructura central que une los brazos del dron no queda exenta del proceso de impresión 3D, sustituyendo así su diseño inicial por otro con espesor variable, nuevos requerimientos de carga y sin necesidad de procesos de corte o taladro.

Al igual que los brazos y la estructura central del dron, las patas que cumplen la función de tren de aterrizaje pueden ser mejoradas o personalizadas con la tecnología 3D.

Su diseño se puede optimizar en función del peso del dron y su durabilidad, pudiéndose incluso imprimir flotadores en caso de necesidad de amerizaje o partes en material flexible como Soft PLA para proteger al equipo de impactos, utilizando una estructura a modo de amortiguación.



Figura 14: Ejemplo de tren de aterrizaje [15]



Por últimos se pueden también sacar provecho de la tecnología 3D para el diseño rápido de accesorios anclados al dron dependiendo de la aplicación final: soportes audiovisuales, transporte de mercancías, equipos de emergencia, etc.



*Figura 15: Ejemplo de accesorios [16]*

La impresión 3D ofrece importantes ventajas para la fabricación de drones y sus accesorios en función de su aplicación, en concreto, los drones multirrotores son los que más se benefician de estas ventajas siendo imprimibles el 100% de su estructura.

Constantemente se incorporan al mercado nuevos materiales que ofrecen mejores prestaciones de servicio aumentando la carga de pago o durabilidad del servicio.

Entre las ventajas de la impresión 3D cabe destacar el prototipado rápido, permitiendo fabricar drones personalizados, optimizar su diseño y pudiendo hacer una validación del diseño a bajo coste.

Los nuevos materiales reforzados unido a las características de la tecnología FDM permiten hacer drones más eficientes a bajo coste además de la reposición e incorporación de nuevas piezas y accesorios que hayan sido diseñadas posteriormente reduciendo el tiempo de entrega y la puesta en servicio del dron.

## 5.4 PROCESO DE FABRICACIÓN ELEGIDO

El proceso elegido para la fabricación del dron hexarrotor será el de **deposición por material fundido (FDM) para todas las partes.**

### 5.4.1 Introducción.

La deposición por material fundido (FDM) es un proceso de fabricación utilizado para el modelado de prototipos y la producción a pequeña escala. Utiliza una técnica de fabricación aditiva, depositando el material en finas capas, para conformar la pieza. Un filamento termoplástico, que inicialmente se almacena en bobinas, es introducido en una boquilla. Ésta se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material y puede desplazarse en tres ejes controlada electrónicamente. La boquilla normalmente la mueven motores a pasos o servomotores.

La pieza es construida con finos hilos del material que se solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla.

Este método de fabricación comienza con un proceso de software, que parte de un fichero estereolitográfico (STL). El fichero es orientado para poder ser impreso, dividido en capas y calcular las trayectorias que la boquilla deberá seguir para depositar el material, capa a capa, para conformar la pieza.

Si son necesarias, se pueden generar estructuras de soporte que, si la máquina es capaz, imprimirá en otro material que tras finalizar la creación de la pieza será retirado.

El termoplástico es fundido y depositado por la boquilla en capas del grosor requerido (capas más finas implican mejor calidad en la pieza final) una a una. Las capas se depositan de abajo hacia arriba. A pesar de que el modelado por deposición fundida es una tecnología muy flexible, y es capaz de realizar piezas muy diversas, existen algunas restricciones sobre las características de lo que se puede fabricar con esta técnica, especialmente en lo referente a la pendiente de los voladizos.

### 5.4.2 Consideraciones del diseño.

Cuando se va a fabricar una pieza en 3D se debe tener en cuenta las limitaciones de tamaño de la tecnología a emplear. Las impresoras 3D tienen una superficie de impresión máxima por donde se desplaza la boquilla extrusora.

En cualquier caso, dependiendo de las características del producto, siempre existe la opción de imprimir la pieza en partes para que posteriormente sean unidas.

El modelo 3D puede ser completamente irreal, pero a la hora de ser impreso se debe tener en cuenta que la versión impresa precisa cumplir con las leyes básicas de la física, como la gravedad.

Las aristas del modelo 3D deben ser non-manifold. Esto significa que cada arista debe unir únicamente 2 superficies. El modelo 3D debe ser un volumen watertight, es decir, completamente cerrado. Hay que tener especial cuidado en el solape de geometría internas, que no deberían estar presentes.

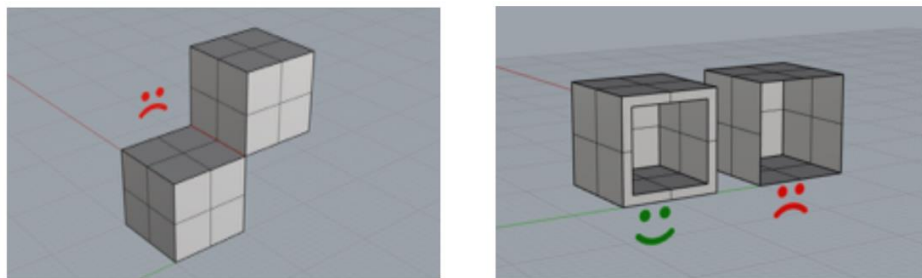


Figura 16: Consideraciones del diseño FDM [17]

### 5.4.3 Resolución y precisión

Cuando se habla de resolución se deben tener en cuenta dos conceptos muy diferentes. La tecnología FDM presenta dos valores fundamentales de resolución. Aquel que define el espesor de capa o resolución en el eje vertical y aquel que define la resolución en el plano horizontal. El primero permite reducir la sensación de laminado, y el segundo permite la obtención de los detalles.

Una limitación adicional relacionada con la resolución es el tamaño de la boquilla extrusora, que determinará el tamaño del punto más pequeño que se puede crear. Para la creación de los modelos, se recomienda que los detalles mínimos se encuentren en el rango de 0.3mm. En cuanto a la resolución en el eje vertical para el FDM Industrial se puede llegar a conseguir 150 micras.

Es importante entender la diferencia que existe entre la resolución del eje vertical y el plano horizontal. La orientación final de la pieza determinará en gran medida la calidad superficial de la misma.

Tanto las partes mecánicas como el mismo filamento (por contracción/dilatación), presentan unos valores de tolerancia que pueden afectar al

tamaño de los elementos finales. Se recomienda tener en cuenta una precisión del 0.3% (tanto en contracción como en dilatación) del tamaño de las piezas, con un mínimo de 0.3mm.

#### 5.4.4 Geometrías imprimibles

Como para las impresoras 3D no es posible imprimir en el aire, el ángulo de inclinación de una pieza que la boquilla es capaz de mantener es cercano a los 45º con la excepción de aquellos modelos que presenten una geometría inestable:

##### Soportes:

Los soportes son necesarios tanto en el interior como en el exterior del modelo. En muchos casos se puede llegar a introducir soportes de manera automática, pero se debe valorar la dificultad que pueden presentar en su retirada.

##### Pandeo y combado:

Cuando se trabaja con piezas de gran tamaño o de espesor reducido, éstas son susceptibles de sufrir procesos de pandeo y combado debido a los procesos irregulares de enfriamiento del material extruido. Se recomienda el uso de costillas y nervios, similares a las que se usarían en procesos de inyección.

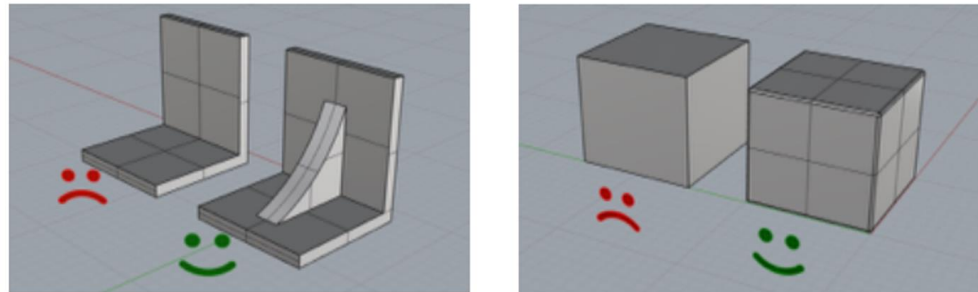
##### Espesor de pared:

A la hora de trabajar con paredes se puede diferenciar entre las paredes que limitan interiores y aquellas que son independientes. Se recomienda que el espesor mínimo de las mismas tenga relación con el espesor de capa, siendo una buena elección un valor mínimo de 4 veces el espesor de capa, con un mínimo de 1mm.

En el caso de paredes que limiten interiores, se recomienda un espesor mínimo de 1.4mm. Una técnica adicional para reducir el estrés al que se ven sometidas las paredes y aumentar su resistencia es añadir radios de empalme.

##### Esquinas:

Las esquinas afiladas dan lugar a acumulaciones de tensión en las piezas. Se recomienda el uso de esquinas redondeadas para reducir las tensiones y mejorar el resultado final.



*Figura 17: Pandeo, combado y esquinas FDM [18]*

#### Agujeros:

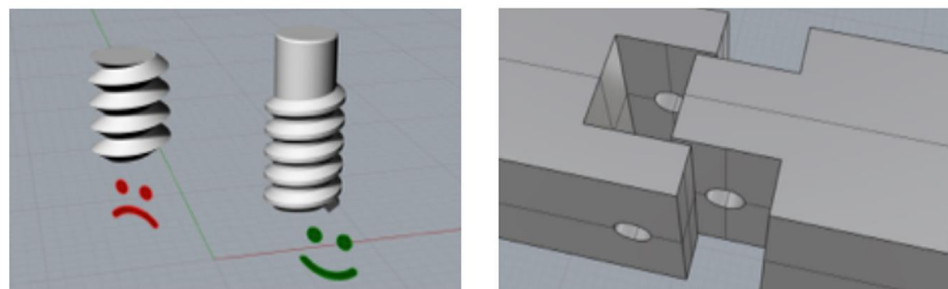
La mayor parte de los materiales empleados en FDM pueden ser mecanizados después de su impresión. Si la pieza presenta agujeros, es mejor realizar éstos mediante taladro tras la impresión debido a que el material presenta tendencia a reducirlos.

#### Roscados:

Se pretende fundamentalmente evitar las esquinas afiladas. Aunque los roscados de FDM son funcionales, no se recomienda que sean de pasos muy bajos ni de longitudes muy largas.

#### Piezas relacionadas:

Como ya se ha comentado, la tecnología FDM permite la intersección y conexión de piezas. En la mayoría de los casos se debe considerar una holgura mínima de 0.4mm para encajes de movimiento. Si se trata de un encaje de ensamblaje, se considerará una holgura mínima de 0.3mm entre piezas.



*Figura 18: Roscados y piezas relacionadas FDM [19]*

## CAPITULO 6.

# DISEÑO.

El dron tendrá la capacidad de mantener en el aire un peso de 6kg y la estructura estará formada por los siguientes componentes:

- **Brazo:** soporta el peso del motor y lo une al cuerpo central.
- **Cuerpo central:** Es la base del dron, soporta el peso y está unido a todas las partes.
- **Tren de aterrizaje:** Soporte que permitirá al dron apoyarse sobre el suelo y facilitara las operaciones de aterrizaje y despegue.
- **Porta accesorios:** Elemento para conectar a accesorios como cámaras o carga de pago.

### 6.1 PROGRAMAS UTILIZADOS

Para realizar un análisis estructural sobre los componentes del dron se utilizará el código comercial de elementos finitos Abaqus.

#### 6.1.1. Método de elementos finitos

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

En cualquier sistema a analizar se puede distinguir entre:

**Dominio:** Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.

**Condiciones de contorno:** Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema como las cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor,...

**Incógnitas:** Variables del sistema que se desea conocer después de que las condiciones de contorno actúen sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas,...

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el

tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide.

Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos se puede calcular el resto de incógnitas de interés: tensiones, deformaciones,... A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que determinan el estado y/o posición del nodo.

### 6.1.2. Principios generales aplicados a un continuo elástico

A continuación se muestran algunas de las ideas básicas relacionadas con los fundamentos matemáticos del MEF aplicadas al caso estructural.

#### 6.1.2.1 Ecuaciones de equilibrio. Principio de los Trabajos Virtuales

Muchos problemas de medios continuos vienen expresados mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno sobre la función o funciones incógnita. Ante la dificultad, y en muchos casos la imposibilidad, de encontrar una solución cerrada, se opta por realizar una aproximación, siendo necesaria la expresión integral del Principio de los Trabajos Virtuales (PTV). Se considera un continuo elástico como el de la figura sometido a unas fuerzas superficiales  $\{t\} = \{t_x, t_y, t_z\}^T$  y a unas fuerzas por unidad de volumen  $\{X\} = \{X_x, X_y, X_z\}^T$ . El vector desplazamientos lo notará por  $\{u\} = \{u, v, w\}^T$ . Las deformaciones correspondientes a estos desplazamientos son:

$$\{\varepsilon\} = \{ \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx} \}^T$$

Las tensiones debidas a estas deformaciones serán:

$$\{\sigma\} = \{ \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx} \}^T$$

Las ecuaciones de equilibrio para un elemento diferencial de volumen pueden escribirse de la forma:

$$\nabla\{\sigma\} + \{X\} = 0$$

donde el vector  $\{X\}$  incluye de forma general las fuerzas de inercia  $\{X\} = \{X\} - \rho\ddot{u}$ , es decir, considerando las fuerzas de inercia como fuerzas por unidad de volumen. Multiplicando esta ecuación por una función de ponderación  $\{du\}$  e integrando.

$$-\int_v \nabla \{du\}^T \{\sigma\} dv + \int_v \{du\}^T \{X\} dv$$

Utilizando la formula de Green se puede escribir

$$-\int_v \nabla \{du\}^T \{\sigma\} dv + \int_s \{du\}^T \{\sigma\} \bar{n} ds + \int_v \{du\}^T \{X\} dv = 0 \quad (1.1)$$

El equilibrio en el contorno exige que se cumpla la relación  $\{\sigma\} \cdot \{n\} = \{t\}$  y sustituyendo en la expresión (1.1)

$$-\int_v \{d\varepsilon\}^T \{\sigma\} dv + \int_s \{du\}^T \{t\} \bar{n} ds + \int_v \{du\}^T \{X\} dv = 0 \quad (1.2)$$

En la relación anterior es posible introducir la ley de comportamiento de material mediante la matriz elástica con las propiedades de éste, [C], de forma que:

$$\{\sigma\} = [C] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\} \quad (1.3)$$

Siendo los vectores  $\{\sigma_0\}^T$  y  $\{\varepsilon_0\}^T$  las deformaciones y las tensiones iniciales respectivamente. Introduciendo la expresión (1.3), suponiendo deformaciones y tensiones iniciales nulas, en la ecuación (1.2), se obtiene:

$$\int_v \{d\varepsilon\}^T [C] \{\varepsilon\} dv = \int_v \{du\}^T (\{X\} - \rho \{\ddot{u}\}) dv + \int_s \{du\}^T \{t\} ds \quad (1.4)$$

Que constituye la formulación del PTV y relaciona el sistema de cargas real y esfuerzos con el virtual de desplazamientos.

### 6.1.2.2 Funciones de interpolación

Discretizado el continuo, la idea es tomar un conjunto de funciones (funciones de interpolación) que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro del elemento en función de los desplazamientos en los nodos del mismo. Es decir:

$$\{u(x,y,z)\} = [N(x,y,z)]\{U\}$$

Siendo  $\{U\}$  el vector con los desplazamientos nodales. Una vez conocidos los desplazamientos en todos los nodos se determinan las deformaciones

$$\{\varepsilon\} = [D]\{u\}$$

Donde [D] es el operador diferencial que depende del problema en estudio. Sustituyendo el valor del desplazamiento se obtiene:

$$\{\varepsilon\} = [D][N]\{U\} = [B]\{U\}$$

Donde se obtiene el valor de las deformaciones en función de los desplazamientos nodales.

Sustituyendo la ecuación anterior en la expresión del PTV (1.4) se obtiene:



$$-\int_v [B]^t [C] [B] \{U\} dv + \int_v [N]^T (\{X\} - \rho [N] \{\ddot{u}\}) dv + \int_s [N]^T \{t\} ds = 0$$

Reordenando esta ecuación se puede llegar a un sistema de la forma  $[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\}$  donde se definen:

- Matriz de masa consistente  $[M] = \int_v [N]^T \rho [N] dv$
- Matriz de rigidez  $[K] = \int_v [B]^T [C] [B] dv$
- Matriz de cargas nodales consistentes  $\{P\} = \int_v [N]^T \{X\} dv + \int_s [N]^T \{t\} ds$

La expresión anterior es general y permite determinar las matrices elementales para cualquier tipo de discretización.

### 6.1.2.3 Síntesis de las características globales

Las anteriores matrices se calculan para cada uno de los elementos. Realizando una transformación de coordenadas a las denominadas coordenadas unitarias del elemento, las matrices quedan en función de parámetros puramente geométricos y se facilita la integración numérica.

Antes de proceder al ensamblaje de todas las ecuaciones hay que realizar la transformación a coordenadas globales con el objeto de tener todas las matrices formuladas respecto al mismo sistema de coordenadas. Una vez que se dispone de las matrices y vectores elementales en coordenadas globales su acoplamiento en el sistema puede realizarse según el llamado método directo, por el que sumamos en cada posición nodal la contribución realizada por los distintos elementos.

### 6.1.2.4 Imposición de condiciones de contorno. Solución

Antes de obtener la solución al sistema de ecuaciones planteado es necesario imponer las condiciones de desplazamientos nodales que sean conocidas. El sistema resultante se puede subdividir en dos términos: uno que contenga los desplazamientos impuestos y otro los incógnita. Resolviendo este sistema se obtiene la solución. Una vez conocidos los desplazamientos nodales es posible calcular otro tipo de magnitudes como deformaciones o tensiones.

### 6.1.2.5 Abaqus 6.13 y Solid Works 2015

La estructura de Abaqus está formada por un preprocesador llamado CAE, que genera un archivo que se denomina input file con el que se ha definido el problema.

Ese archivo se resolverá a través del procesador (implícito o explícito) que generara un archivo de salida donde se encuentran los datos de la solución del problema. Se necesitará un postprocesador, que es un entorno grafico de salida donde se generaran unos archivos que aportan cierta información.

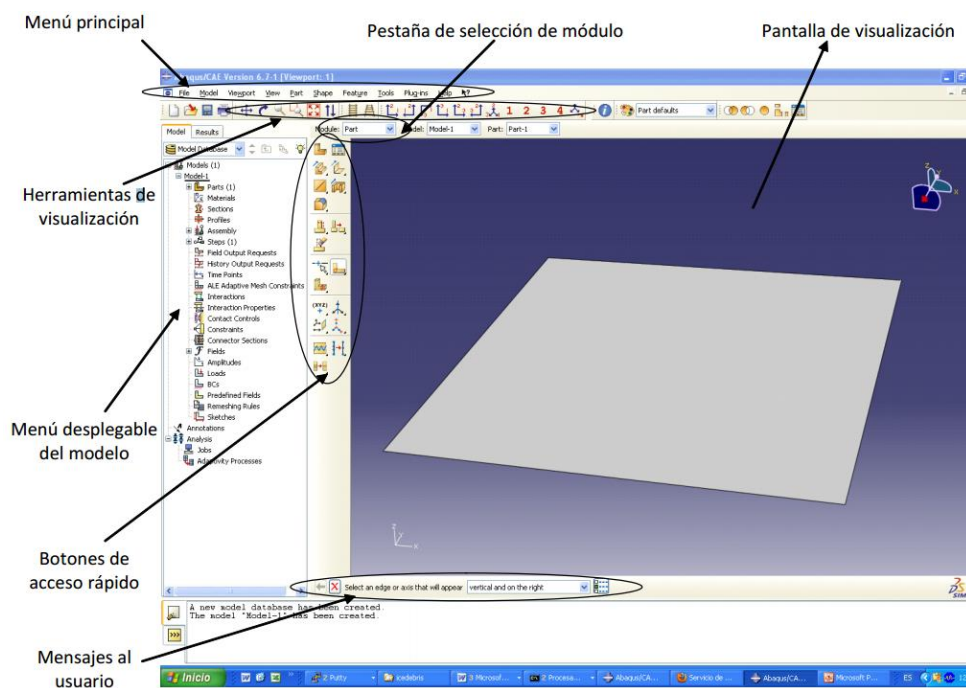


Figura 19: Pantalla principal Abaqus CAE [10]

SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 3D. Una vez se haya confirmado la geometría mediante el análisis estructural de Abaqus, se realizara el diseño en Solidworks para lograr mejor presentación.

Mediante este programa se creará el archivo necesario para que el software de impresión 3D pueda interpretarlo y proceda a su fabricación.

## 6.2 DISEÑO DEL BRAZO.

En este apartado se explicará el procedimiento para realizar el diseño del brazo del dron.

### 6.2.1 Diseño inicial

A través de Abaqus se accede a Abaqus CAE, que es un entorno gráfico dividido en varios módulos donde se comienza a plantear el problema. Abaqus es un programa que trabaja en unidades dentro del S.I de manera que cada vez que haya que introducir o interpretar resultados debe hacerse en las unidades correctas.

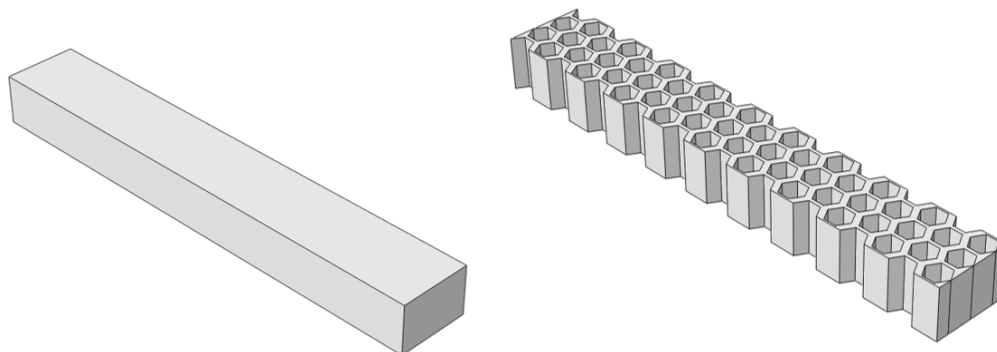
La forma más fácil de trabajar en abaqus el realizar el paso a través de todos los módulos del orden siguiente:

#### **Módulo Part:**

Se define la geometría de los componentes que forman parte del modelo, llamados parts.

El proceso comienza con cuerpo inicial de partida, en este caso será una viga de sección rectangular de 20x2x3 cm a la que se le aplicarán diferentes operaciones hasta obtener el resultado final.

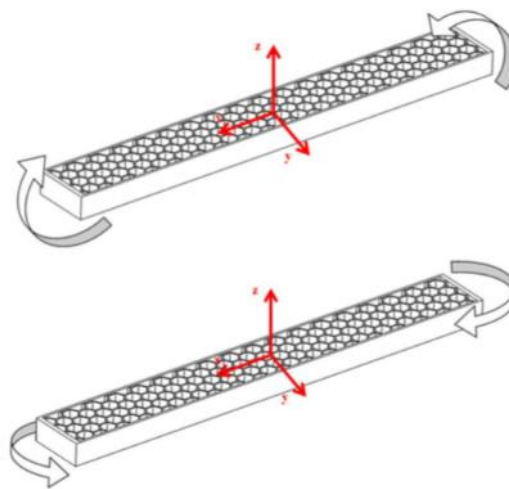
La primera operación será un vaciado hexagonal sobre toda la superficie superior hasta la superficie inferior dando lugar a una estructura formada por hexágonos.



*Figura 20: Proceso de vaciado.*

Los motivos de realizar este proceso antes de la optimización se explican a continuación:

- Es un tipo de estructura capaz de soportar esfuerzos de flexión tanto en el eje Y como en el eje Z haciendo una estructura ideal para el brazo del dron multirroto, el cual tiene que soportar el peso y el momento que ejerce el motor.



*Figura 21: Esfuerzo estructura hexagonal [11]*

- Teniendo en cuenta el proceso de fabricación, en este caso la deposición por material fundido mediante impresión 3D, se trata de un proceso de impresión capa a capa comenzando por la cara inferior hasta la cara superior de la estructura. Los objetos cuya sección a lo largo del eje vertical es constante son mucho más fáciles de imprimir y dan lugar a menos errores comparándolos con estructuras cuya sección vertical no es constante.

Es por ello que se desea mantener esta estructura en el brazo del dron, siendo la causa de realizar esta operación antes que el proceso de optimizado.

#### **Módulo Property:**

Se definen las propiedades de los materiales y se asignan a las diferentes parts del modelo a analizar.

El material será el plástico ABS M-30 cuyas propiedades se encuentran en la tabla 2.

Las propiedades necesarias para realizar el análisis estructural del brazo del dron serán (Tabla 2):

- Densidad= 1040 kg / m<sup>3</sup>.
- Modulo de Young= 2.4MPa.
- Coeficiente de Poisson= 0.33

Cabe mencionar que las propiedades del material deben ser añadidas en el apartado de propiedades mecánicas elásticas, puesto que se trabajara en régimen elástico sin sobrepasar el límite elástico del material.

#### **Módulo Assembly:**

Se ensamblan las partes y se definen las posiciones relativas que ocupan en el espacio cada una de ellas.

Como en el análisis estructural se realizara a las piezas por separado no se necesita ningún ensamblaje.

#### **Módulo Step:**

Se define el tipo de problema que se va a resolver y las variables de salida que se desea obtener en el archivo con extensión odb.

Para realizar correctamente el análisis estructural se deberá crear un step o estado donde se incluirán todas las cargas sobre la estructura. El programa diferenciara sobre el step Initial, creado por defecto donde no actúa ninguna carga y el step creado para el análisis estructural.

#### **Módulo interaction:**

Se define la interacción entre los distintos elementos o partes que forman el modelo.

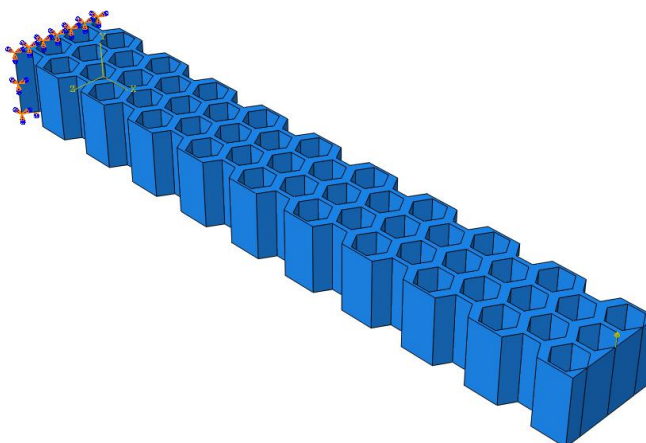
Este módulo no se utilizara puesto que se analizan las partes de forma individual.

#### **Módulo Load:**

Se definen las cargas y las condiciones de contorno del problema.

Para el análisis del brazo en régimen de vuelo se tomara el modelo de una viga empotrada con una fuerza en el extremo que será el empuje creado por el motor.

Este es un modelo que no es real, ya que cuando el dron se encuentra volando en régimen estacionario no existe ningún empotramiento pero se trata de un modelo conservador y debido a su aproximación a los valores reales, es el método que se usa en aviación para determinar las cargas de las estructuras aeronáuticas.



*Figura 22: Viga empotrada con carga en el extremo.*

Como el objetivo es elevar un dron de 6kg en régimen estacionario, el empuje unitario de cada motor para realizar esta operación en condiciones de seguridad, se calcula de la siguiente manera:

$$F = \frac{P \cdot 2}{N} \quad (1)$$

Donde:

- $F$  es la fuerza de empuje del motor.
- $P$  es el peso de la aeronave que se desea levantar .Su valor 6kg.
- $N$  es el número de motores que tiene el dron. Su valor 6 motores.

Por tanto,

$$F = 2\text{kg}$$

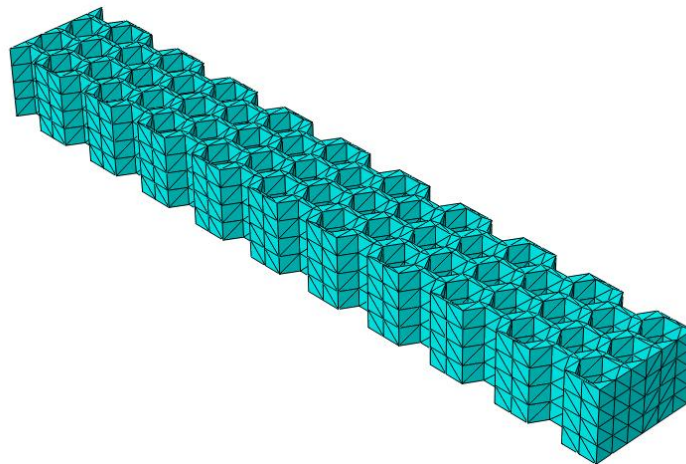
La capacidad de empuje obtenida para levantar un dron de 6kg en condiciones de seguridad y comodidad para la aeronave formada con 6

motores es de 2kg. Ahora es posible obtener un primer análisis para realizar una optimización sobre el brazo.

### **Módulo Mesh:**

Define la malla con la cual se discretiza el modelo en una serie de elementos.

Se establecerá un tipo de mallado libre formado por elementos triangulares. Para lograr mayor precisión, se debe disminuir el tamaño de elementos, obteniendo un mallado final formado por mayor número de elementos.



*Figura 23: Mallado estructura sobre el elemento a analizar.*

### **Módulo Job:**

Permite lanzar el archivo al procesador para que sea resuelto, es el último módulo del preprocesador.

Para poder lanzar un caso se debe crear un Job. Antes de ser lanzado para analizar se evaluará el contenido de manera que si se encuentra algún fallo el sistema abortará el caso de estudio donde se ha producido el error.

### **Módulo Visualization:**

Permite la visualización de los resultados obtenidos además de una simulación de los resultados sobre el modelo.

El programa Abaqus ofrece una cantidad de resultados enorme, por lo tanto, se debe seleccionar los resultados de interés para este caso. El brazo deberá trabajar dentro del régimen elástico, manteniendo de esta manera el control sobre las deformaciones producidas. Para ello, en ningún caso se podrá sobrepasar el límite elástico en la estructura.

Se conocen como teorías de fallo elástico a los criterios usados para determinar los esfuerzos estáticos permisibles en estructuras o componentes de máquinas. Se utilizan diversas formulaciones, dependiendo del tipo de material que se utiliza.

En este caso se utilizara el criterio de fallo de Von Mises, que establece que se produce el fallo elástico cuando el límite elástico es superado en algún punto del material por la tensión de Von Mises.

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles. De esta manera si la tensión de Von Mises se encuentra por debajo del límite elástico la estructura estará trabajando en el régimen elástico.

Además de la tensión de Von Mises es aconsejable obtener el resultado de los desplazamientos estructurales ya que podría encontrarse dentro del régimen elástico pero con una deformación que no permitiría cumplir con el objetivo o no encontrarse en un régimen de trabajo óptimo.



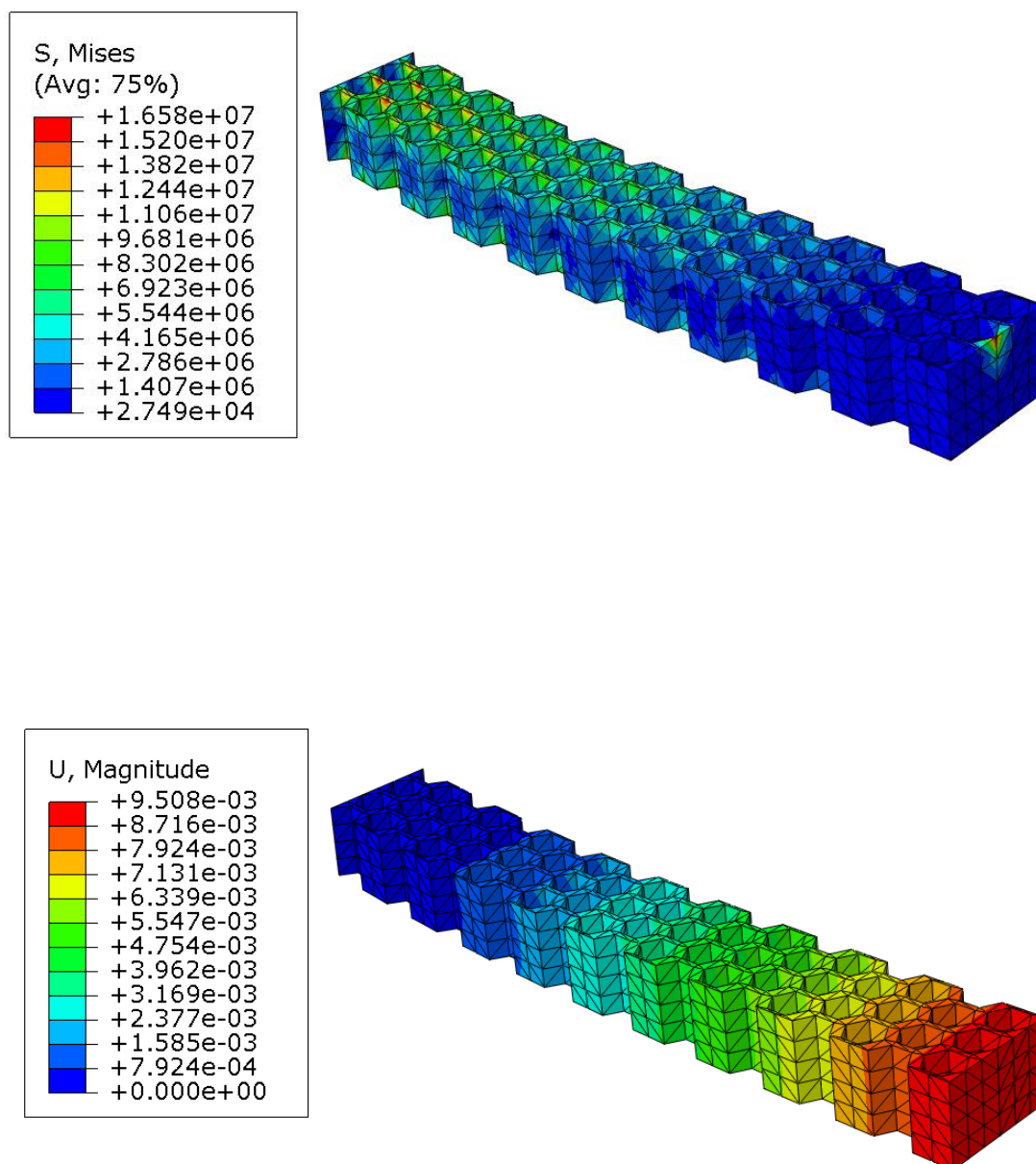


Figura 24: Resultados de tensión y desplazamiento

## 6.2.2 Optimización

### Módulo Optimización

Permite aplicar un proceso de optimización sobre el modelo de acuerdo a unos objetivos marcados.

Este módulo será clave en el desarrollo de la estructura debido a que establecerá el criterio de retirada de material manteniendo la resistencia de deformación debida a las fuerzas externas. Para conseguir la estructura optimizada se deben seleccionar unos parámetros concretos.

El proceso de optimización comienza una vez se aplican las condiciones de carga y las restricciones. La optimización será del tipo *topology*, este tipo de optimización mantiene la forma inicial de la estructura a la hora de realizar la retirada de material mientras que la tipo *shape* realizara cambios de forma, que no es el objetivo aunque es igualmente válida. A continuación se deberá seleccionar el objetivo de la función de optimización, que será *strain energy*.

El concepto de energía de deformación es muy importante en este apartado. La energía de deformación es el aumento de energía interna acumulado en el interior de un sólido deformable como resultado del trabajo realizado por las fuerzas que provocan la deformación.

Por último se debe introducir la restricción de volumen. Para este caso se ha indicado que la estructura optimizada deberá contener una fracción de volumen igual o menor que 40% del volumen inicial.

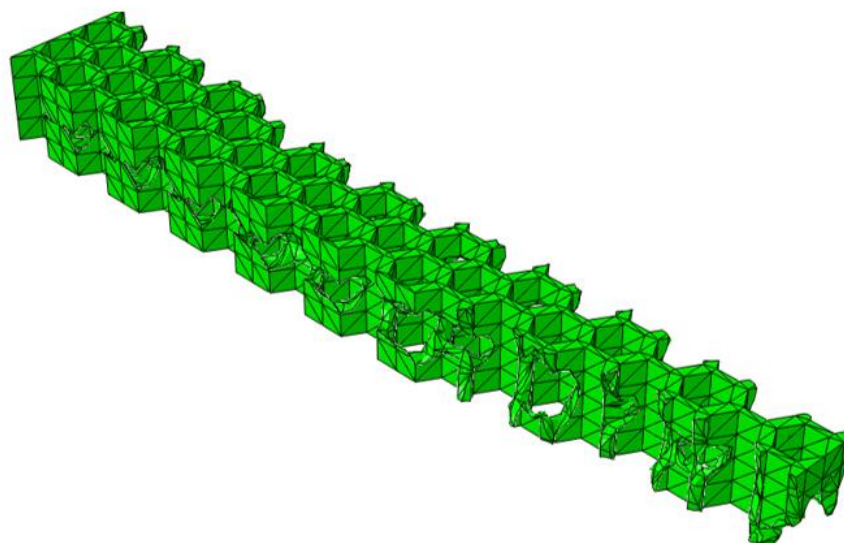


Figura 25: Resultado del proceso de optimización.

Se debe aclarar que del proceso de optimización no se obtiene la estructura ideal para el objetivo deseado sino el criterio para la retirada del material manteniendo las condiciones adecuadas. Por lo tanto la estructura deberá ser reinterpretada en el módulo part incluyendo los cambios que permitirán reducir el peso obteniendo mejores condiciones para el vuelo del dron.

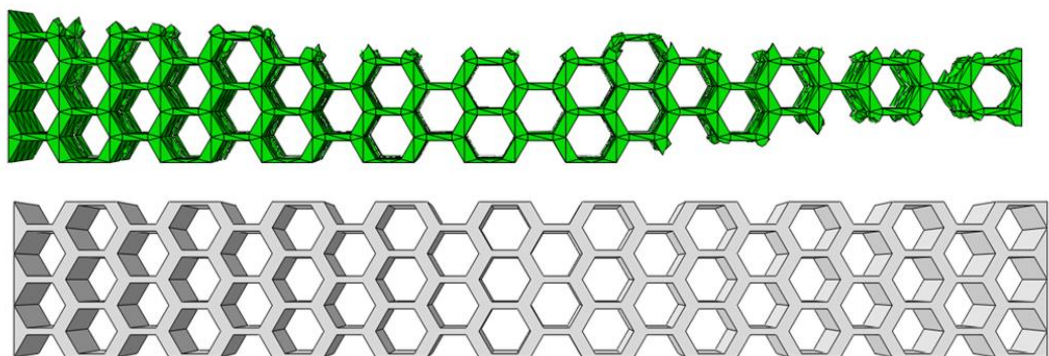
Se trata de un proceso iterativo en el que a través de la optimización obtendremos una nueva pieza que deberá pasar otra vez por todos los módulos hasta obtener su propio análisis estructural. Este proceso iterativo se puede repetir varias veces hasta que el resultado de la optimización apenas muestre cambios respecto a la estructura de la iteración anterior o los resultados de tensión y desplazamiento se encuentren dentro del rango óptimo.

No siempre se utilizan todos los módulos ya que dependiendo del caso algunos sean prescindibles al igual que no siempre se avanza de manera secuencial, esto depende de las condiciones y los objetivos del problema.

### 6.2.3 Diseño a partir de la optimización.

Una vez que se han obtenido los resultados de la optimización se realizara un segundo ciclo a través de los módulos de Abaqus CAE.

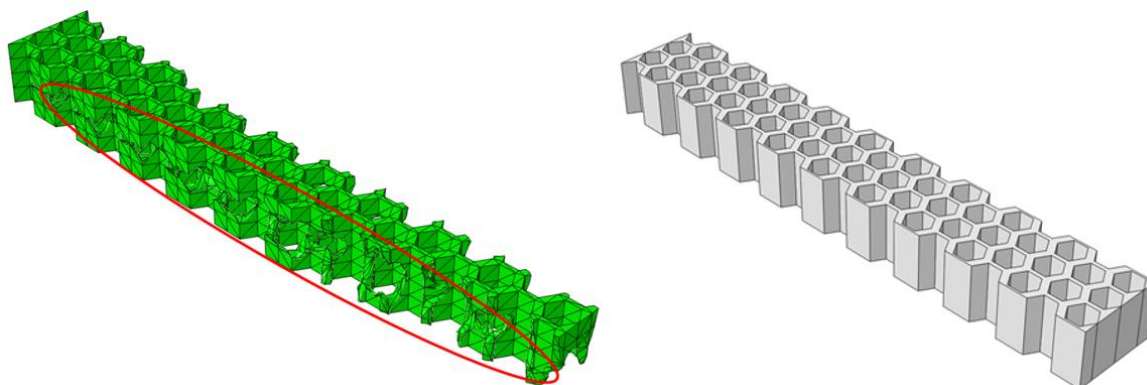
Antes de realizar cualquier cambio sobre la estructura se debe analizar las diferencias entre la viga optimizada y la inicial:



*Figura 26: Comparación de la sección de la viga inicial y optimizada.*

Interpretando la imagen anterior, lo primero que se observa es un estrechamiento a lo largo de la sección, esto aporta una noción básica de cómo retirar material de la viga.

De esta manera el estrechamiento se debe realizar de forma simétrica para repartir las tensiones lo mejor posible conservando una sección mínima en el extremo para no tener acumulación de tensiones cuando se añada el soporte del motor.



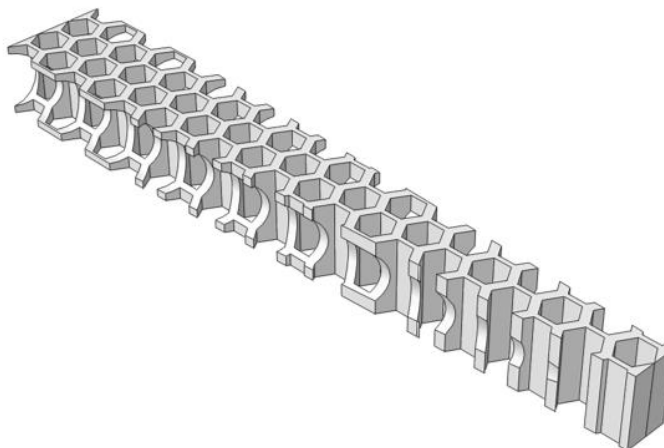
*Figura 27: Comparación lateral viga inicial y optimizada.*

Desde otro punto de vista se observa que la optimización ha realizado un proceso de retirada de material a lo largo de la zona lateral de la estructura. Al igual que en la comparación anterior se realizara un vaciado lateral de sección constante.

Volviendo al ciclo de Abaqus en el *módulo part* se realizaran las siguientes operaciones sobre la viga inicial:

- Un estrechamiento aplicado en la cara superior a lo largo de toda la viga reduciendo la sección desde el empotramiento hasta el extremo.
- Un vaciado lateral simétrico por ambos lados.

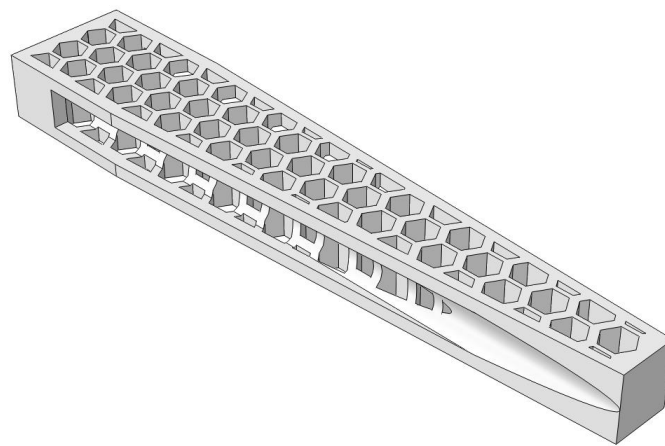
El resultado de las operaciones realizadas es el siguiente:



*Figura 28: Viga optimizada.*

Después de aplicar la optimización se pueden observar cuales son las zonas aparentemente más débiles y que pueden ser mejoradas. Se puede observar que en el extremo la estructura apenas está unida, lo que sin duda ocasionará problemas en el futuro.

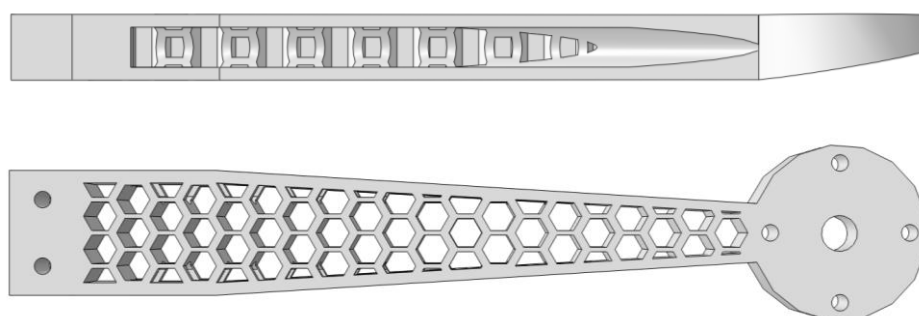
Para mejorar la situación de la viga, mejorar el aspecto visual y facilitar la unión con el soporte del motor y una superficie de unión al resto del dron, se va a realizar una operación para envolver la estructura en un marco que aportará la rigidez a toda la estructura.



*Figura 29: Viga optimizada.*

Después de este proceso se ha ganado una pequeña cantidad de masa que se verá representada en una ganancia de prestaciones a la vez que la estructura poco a poco se asemeja al brazo de un dron.

Para continuar con el diseño conviene saber el tipo de unión de la estructura con el resto del cuerpo del dron y con el motor. La parte empotrada será unida al cuerpo mediante una unión atornillada, por el contrario, el soporte del motor formara parte del brazo. Estas operaciones requieren un proceso de creación de material en la viga por lo que se intentara reducir al máximo el tamaño de estas incorporaciones.



*Figura 30: Incorporación de soportes para uniones.*

Una vez incorporados estos elementos a la viga, esta se encuentra en condiciones de ser analizada estructuralmente.

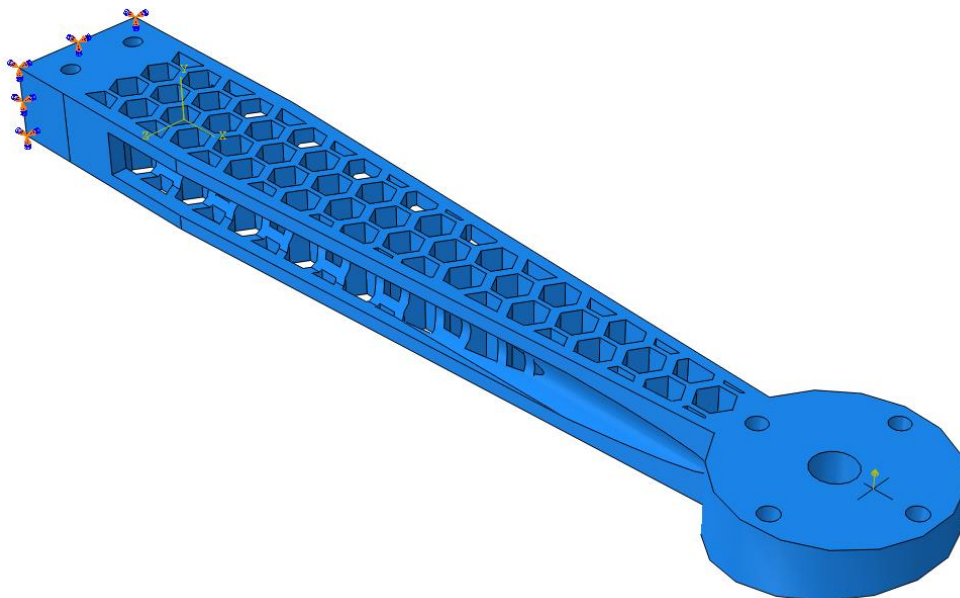
Siguiendo a través de los módulos, se deben aplicar las condiciones de servicio del dron.

En el módulo load se selecciona el extremo que debe ir atornillado al cuerpo como un empotramiento, mientras que se aplica la carga en el extremo contrario.

Como se comentó anteriormente, el empuje proporcionado por motor debido al objetivo deseado es de 2kg, utilizando el sistema de unidades de Abaqus correspondería a 19.6 N.

El soporte del motor necesita un agujero en la zona central debido al diseño de los motores de dron. Como no se puede aplicar una carga en un lugar donde no hay material la zona de aplicación del empuje del motor ha sido corregida situándose en una zona más alejada respecto al empotramiento.

Aunque no sean las condiciones reales de trabajo, al aumentar la distancia respecto al empotramiento crea una situación más exigente que la de servicio por lo tanto se utilizará esta aproximación para obtener los resultados del análisis estructural.



*Figura 31: Sistema de cargas aplicado.*



A continuación se debe aplicar una malla en el *modulo mesh*. Cabe destacar que para este caso, se ha realizado con un tamaño menor y se ha refinado en las zonas que concentren mayor número de tensiones. De este modo se medirá con mayor precisión el valor de la tensión de trabajo en cada zona de la estructura.

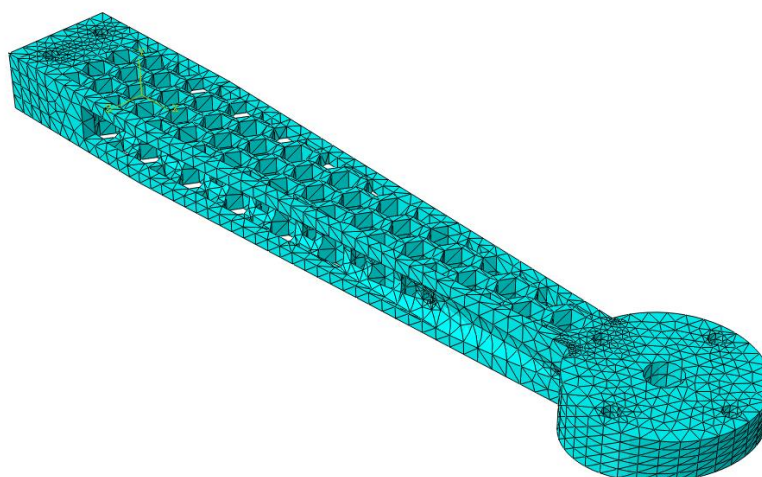


Figura 32: Mallado estructural.

Una vez en el módulo Job se lanzará el caso para ser analizado y si ningún error lo impide se obtendrán los resultados en el módulo Visualization.

#### 6.2.4 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos son los siguientes:

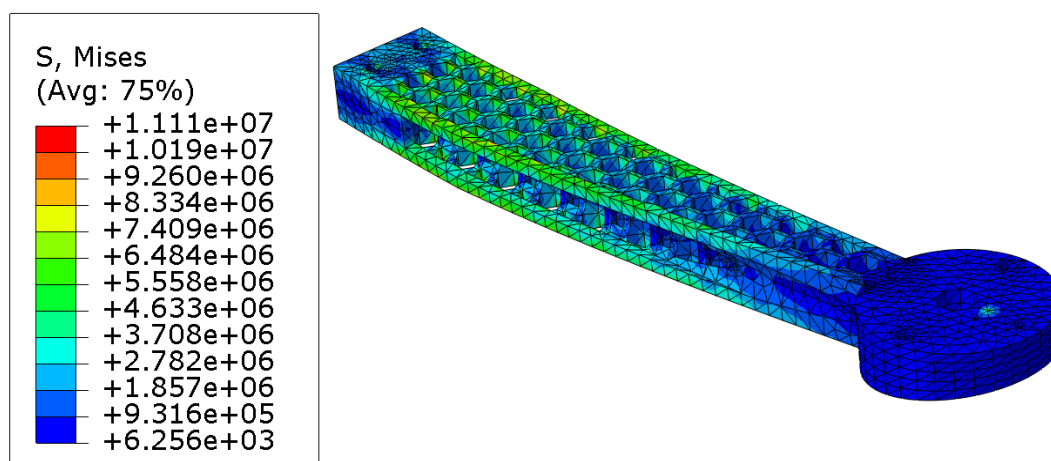


Figura 33: Análisis tensión Von Mises en el brazo.

De los resultados se obtienen los valores máximos de la tensión de Von Miseses y como se distribuye a lo largo de la estructura.

Para asegurar la integridad estructural de la viga la tensión de Von Mises en cualquier punto debe ser menor que la tensión admisible resultante de aplicar un coeficiente de seguridad de 1.2 al límite elástico. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{VM} = \frac{S_e}{1.2} \quad (2)$$

Donde:

- $\sigma_{VM}$  es la tensión máxima de Von Miseses en cualquier punto.
- $S_e$  es el límite elástico del material. Su valor 26MPa (ver Tabla 2).

Por tanto,

$$\sigma_{VM} = 21.67 \text{ MPa}$$

De los resultados se obtiene que la tensión máxima de Von Miseses es de 11.1MPa, cumpliéndose así la condición de integridad estructural durante el servicio. También se puede observar que la mayor concentración de tensiones se encuentra en los largueros laterales de manera que si se desea mejorar el brazo o utilizarlo en unas condiciones de servicio más exigentes, sería la parte de la estructura que se debería reforzar.

Respecto al desplazamiento de la estructura se obtienen los siguientes resultados:

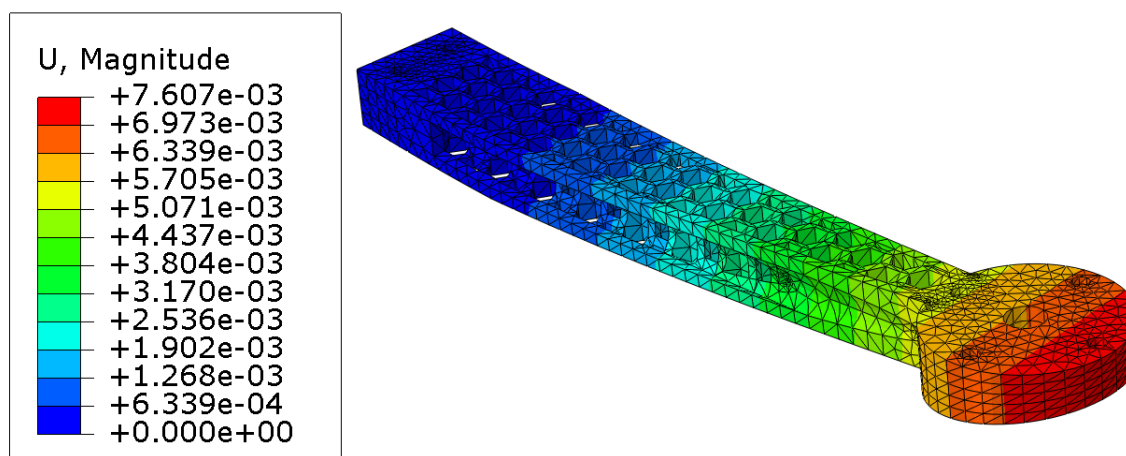


Figura 34: Análisis de máximo desplazamiento en el brazo.

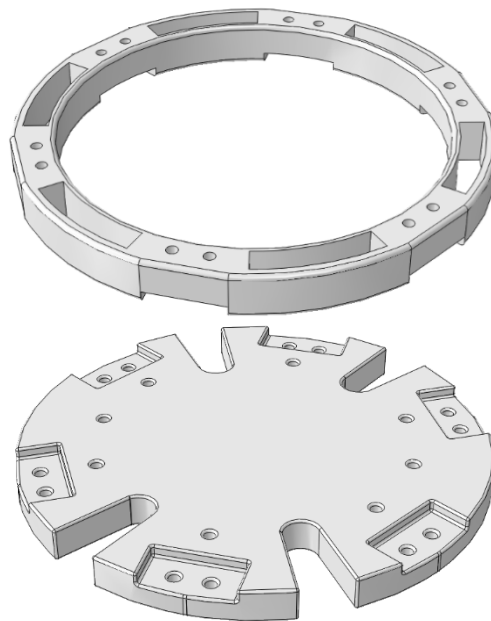


De los resultados se obtienen los valores máximos del desplazamiento vertical a lo largo de la estructura. Su valor es 7.61mm y se produce en el extremo.

### 6.3 CUERPO CENTRAL

El cuerpo central es la parte del dron que estará unida a los brazos, al tren de aterrizaje y a los accesorios con los que cuente.

El cuerpo central se ha dividido en dos partes, una de ellas soportara todo el peso del dron mientras que la otra simplemente se utilizará para reforzar las uniones atornilladas de los brazos con el cuerpo.



*Figura 35: Cuerpo central.*

Para realizar el análisis estructural del cuerpo central y el resto de componentes se ha utilizado el mismo proceso aplicado a los brazos del dron con la excepción de la iteración. En lugar de realizar una optimización mediante el módulo optimization, se realizarán modificaciones en el diseño en función de los resultados obtenidos.

En primer lugar, se ha realizado un corte de simetría. Se tomará como empotramiento la cara resultante de haber realizado el corte simétrico. Las cargas que se incluirán son las siguientes:

▪ **Peso de la batería y componentes:**

Se ha estimado un peso de las baterías y componentes electrónicos igual a 3kg como condiciones más desfavorables. Para realizar una correcta distribución en la zona central del cuerpo se ha aplicado una presión equivalente a su peso mediante la siguiente expresión:

$$P_c = \frac{M_b \cdot g}{A_b} \quad (3)$$

Donde:

- $P_c$  es la presión ejercida sobre la parte central.
- $M_b$  es la masa de la batería y los componentes en las condiciones más exigentes. Su valor 3kg.
- $A_b$  es el área de la zona central. Su valor es 0,0042m<sup>2</sup>.
- $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad. Su valor es 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Por tanto,

$$P_c = 7,048 \text{ kPa}$$

▪ **Peso de los accesorios.**

Para simular el peso de los accesorios en las condiciones más desfavorables se ha estimado una carga de pago máxima de 3kg. Para su correcta distribución sobre las uniones al cuerpo central se ha aplicado una presión equivalente a su peso mediante la siguiente expresión:

$$P_a = \frac{M_a \cdot g}{A_u} \quad (4)$$

Donde:

- $P_a$  es la presión ejercida sobre el cuerpo del dron.
- $M_a$  es la masa de los accesorios en las condiciones más exigentes. Su valor 3kg.
- $A_u$  es el área de las uniones. Su valor es 2,95·10<sup>-5</sup>m<sup>2</sup>.
- $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad. Su valor es 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Por tanto,

$$P_a = 0.998MPa$$

▪ **Empuje del motor**

Para incluir el empuje del motor en el análisis estructural se ha aplicado una presión en la zona de unión del brazo con cuerpo y con el soporte de ayuda para la unión atornillada. Por lo tanto la presión creada por cada motor se repartirá en ambas piezas. La presión creada por cada motor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{M_x \cdot y}{I_x} \quad (5)$$

Donde:

- $P_e$  es la presión ejercida sobre el cuerpo del dron por el empuje del motor.
- $M_x$  es el momento flector creado por el empuje del motor. Su valor es 4,8 Nm.
- $I_x$  es el eje principal de inercia del brazo. Su valor es  $1,81 \cdot 10^{-5} m^4$ .
- $y$  es la altura del brazo desde el eje principal de inercia. Su valor es 0,14.

Por tanto,

$$P_a = 3.74 kPa$$

El cuerpo central con el sistema de cargas aplicado junto al plano de simetría sería el siguiente:

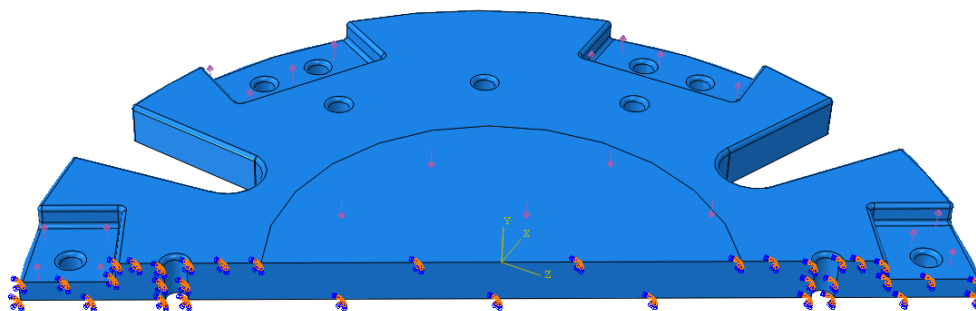


Figura 36: Corte de simetría sobre el cuerpo central.

Los resultados finales obtenidos del cuerpo central son los siguientes:

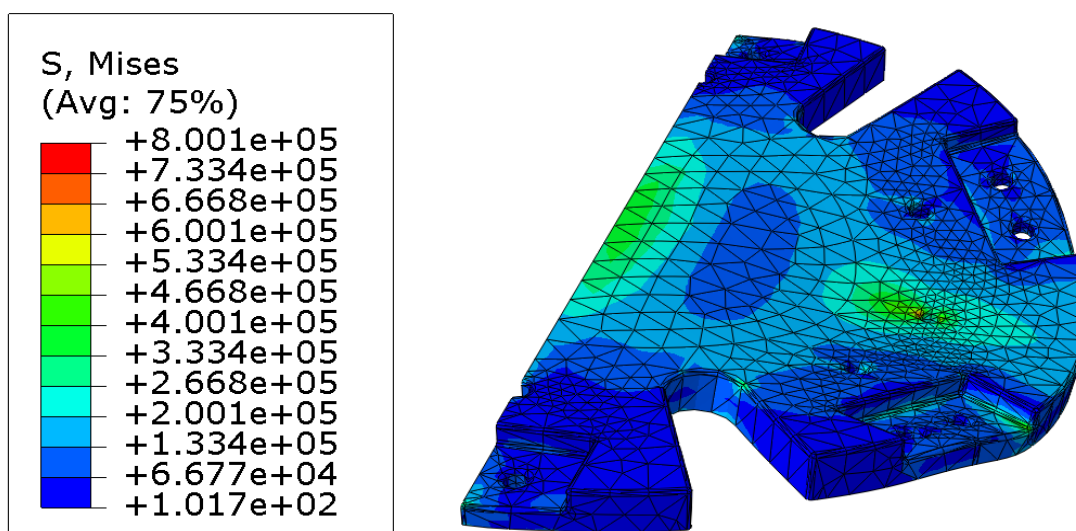


Figura 37: Resultados cuerpo central.

Para asegurar la integridad estructural del cuerpo central la tensión de Von Mises en cualquier punto debe ser menor que la tensión admisible resultante de aplicar un coeficiente de seguridad de 1.2 al límite elástico calculado con anterioridad. Su valor es 21.67MPa.

Los resultados indican que el valor máximo de la tensión de Von Misses es de 0.8 MPa que se encuentra en las zonas de empotramiento, por lo tanto se cumple el criterio de integridad estructural. El desplazamiento máximo de produce en el extremo y su valor es de 0.035mm.

Es evidente que el cuerpo central se puede optimizar más, pudiéndose alcanzar los valores límites de tensión reduciendo su peso. Al ser la parte central donde se unen todos los elementos y tener un espesor 1cm se ha decidido que este sea el resultado final para tener un mayor margen de seguridad en un elemento que se considera el más crítico de la estructura.

Sobre la pieza de ayuda para las uniones atornilladas se aplicará el mismo procedimiento que sobre el cuerpo central. Únicamente se deberán tener en cuenta las cargas debidas al empuje del motor.

Los resultados obtenidos son:

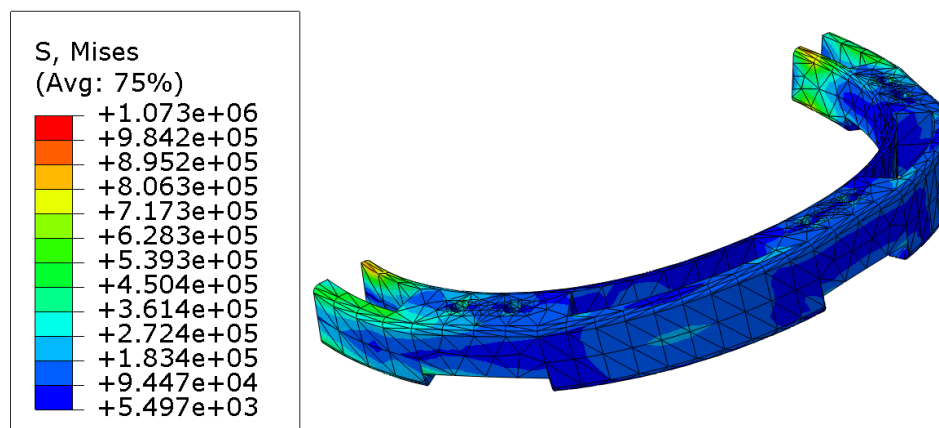


Figura 38: Resultados cuerpo central auxiliar.

Los resultados indican que el valor máximo de la tensión de Von Mises es de 1.07 MPa que se encuentra en las zonas de empotramiento, por lo tanto se cumple el criterio de integridad estructural. El desplazamiento máximo que produce en el extremo y su valor es de 0.134mm.

## 6.4 TREN DE ATERRIZAJE

En tren de aterrizaje es la parte que además de soportar el peso del dron cuando no se encuentra en el aire debe absorber la energía cinética producida por el impacto.

En tren de aterrizaje del dron estará formado por dos piezas fijadas al dron mediante una unión atornillada. El diseño de las patas ha sido concebido para aportar una cantidad mínima de amortiguación disminuyendo la cantidad de vibración que llegue a la estructura pudiendo desestabilizarlo.

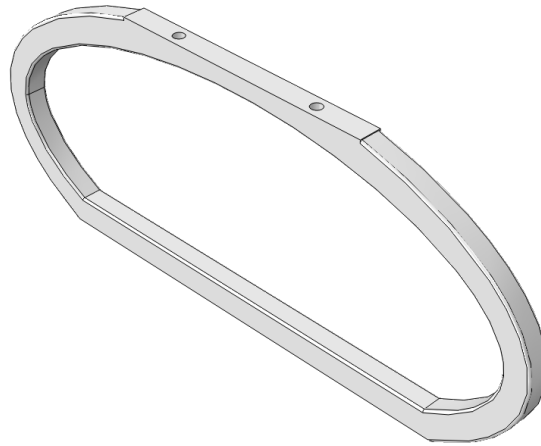


Figura 39: Tren de aterrizaje.

Una vez creado el diseño de la pieza se procede a aplicar las cargas utilizando una presión en lugar de una carga puntual para distribuir mejor las cargas en la zona de contacto entre el cuerpo y las patas. La zona de empotramiento se establece en la base del tren de aterrizaje.

Para calcular la fuerza que ejerce el dron sobre las patas se utiliza la siguiente conversión:

$$F_p = \frac{M \cdot g}{n_p} \quad (6)$$

Donde:

- $F_p$  es la fuerza que ejerce el dron sobre cada pata.
- $M$  es la masa del dron en un modelo conservador. Su valor 8kg.
- $n_p$  es el número de patas. Su valor es 2.
- $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad. Su valor es 9,81 m/s<sup>2</sup>

Por tanto,

$$F_p = 39,2N$$

La presión realizada sobre cada pata se realiza mediante la siguiente expresión:

$$P_p = \frac{F_p}{A_p} \quad (7)$$

Donde:

- $P_p$  es la presión aplicada en cada pata.
- $F_p$  es la fuerza que ejerce el dron sobre cada pata. Su valor es 39.2N.
- $A_p$  es el área de la pata sobre la que se aplicara la fuerza. Su valor 0.0012m<sup>2</sup>.

Por tanto,

$$P = 32,6 \text{ kPa}$$

Los resultados obtenidos del análisis estructural se muestran a continuación:

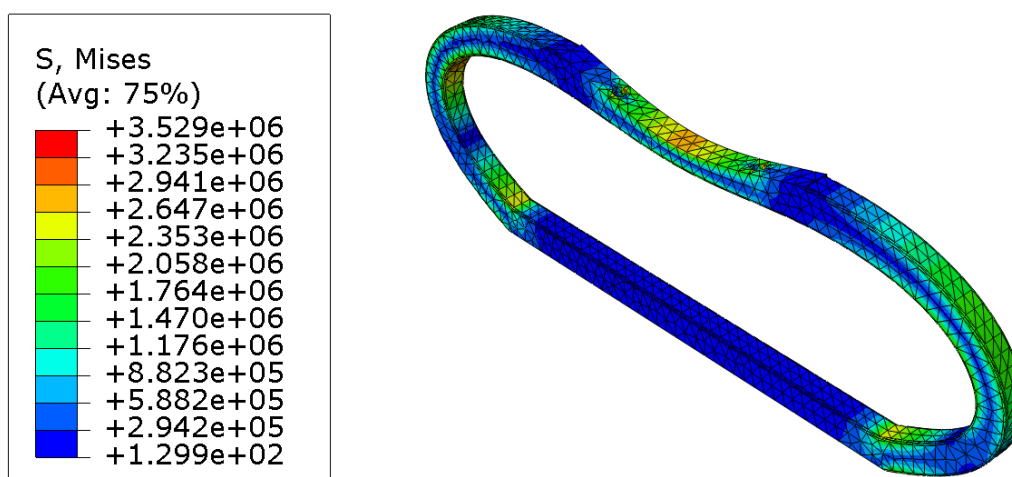


Figura 40: Análisis de tensión de Von Misses en el tren de aterrizaje.

Para asegurar la integridad estructural de la pata la tensión de Von Mises en cualquier punto debe ser menor que la tensión admisible resultante de aplicar un coeficiente de seguridad de 1.2 al límite elástico calculado con anterioridad. Su valor es 21.67MPa.

Los resultados indican que el valor máximo de la tensión de Von Misses es de 3.53MPa que se encuentra en la zona central, por lo tanto se cumple el criterio de integridad estructural.

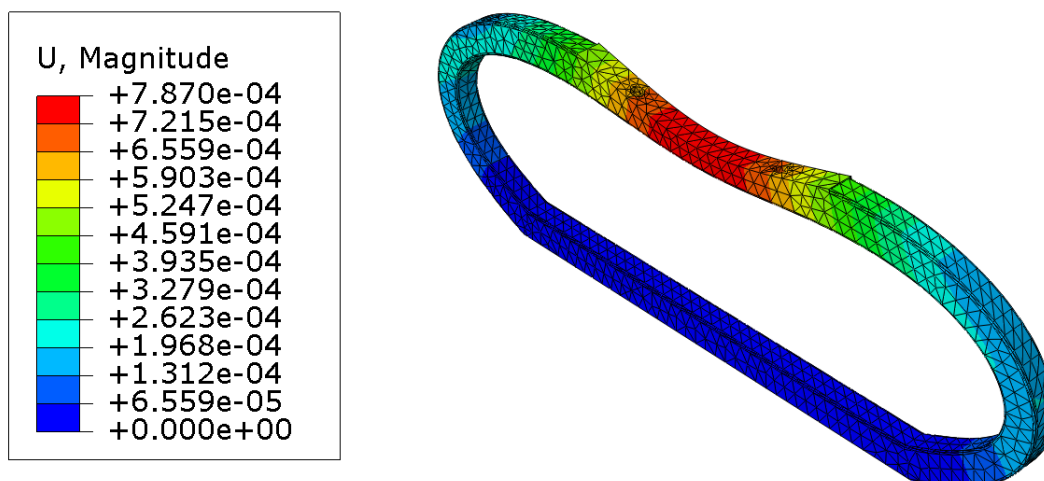


Figura 41: Análisis de máximo desplazamiento en el tren de aterrizaje.

El valor máximo de la deformación de las patas tiene un valor de 0.787 mm y se sitúa en la zona central.

## 6.5 ACCESORIOS

Dentro de la gran variedad de accesorios para drones que existen en el mercado, se ha decidido realizar un análisis estructural sobre un porta cargas multiusos capaz de sostener cualquier objeto dentro de las limitaciones de peso. Este accesorio estará formado por una placa y unos soportes.

### 6.5.1 Placa

La será la superficie encargada de soportar el peso de la carga de pago. Estará situada debajo del cuerpo central del dron, sujeta mediante unas barras por uniones atornilladas. Éstas sujeciones se sitúan en tres puntos de la superficie de la placa dejando la zona delantera accesible para la manipulación de la carga de pago.



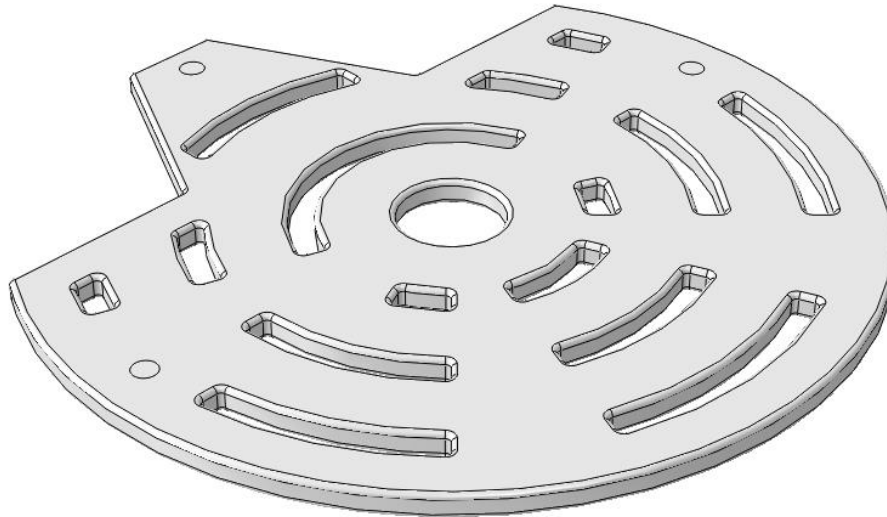


Figura 42: Placa para accesorios.

El análisis estructural se ha realizado distribuyendo un sistema de cargas puntuales sobre la zona central de la placa para poder soportar un peso de 3kg .

Se tomara como empotramiento la zona de unión de la placa con las barras.

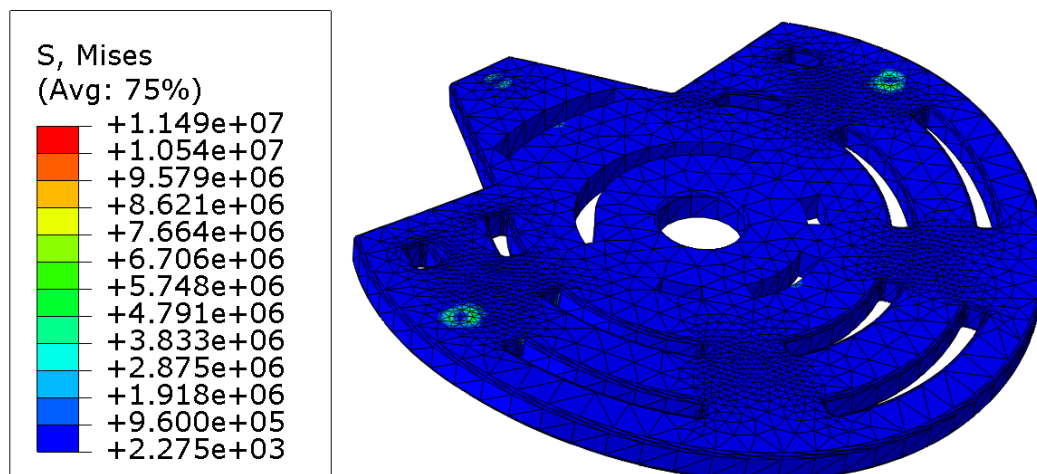


Figura 43: Análisis de tensión máxima de Von Mises en la placa de accesorios.

Para asegurar la integridad estructural de la placa la tensión de Von Mises en cualquier punto debe ser menor que la tensión admisible resultante de aplicar un

coeficiente de seguridad de 1.2 al límite elástico calculado con anterioridad. Su valor es 21.67 MPa.

Se comprueba que el valor máximo de la tensión de Von Mises tiene un valor de 11.5 MPa y se encuentra en las uniones. Por lo tanto esta placa es capaz de cumplir la función de transportar una carga adicional de hasta 3 kg de peso.

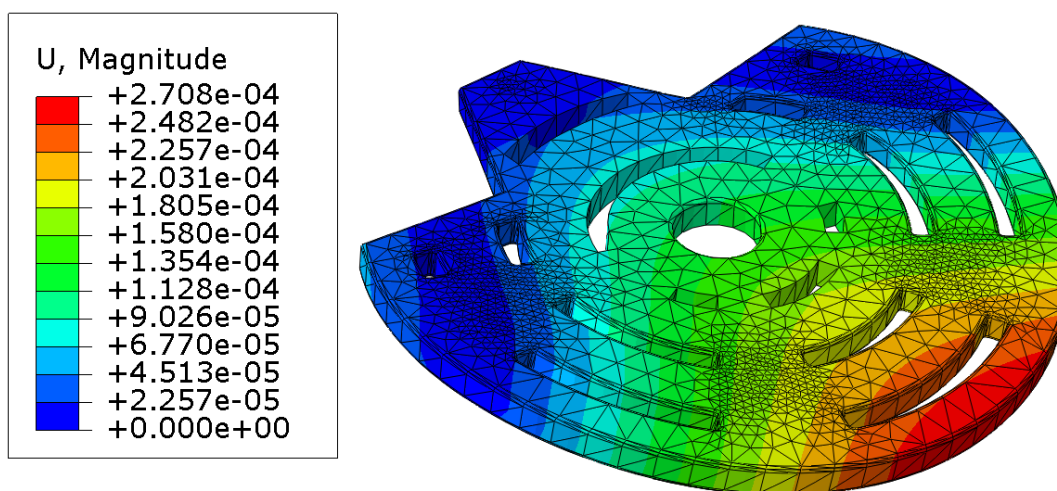


Figura 44: Análisis de máximo desplazamiento de la placa de accesorios

El valor máximo de la deformación de las patas tiene un valor de 0.27 mm en la zona delantera de la placa.

### 6.5.2 Soportes

Los soportes están formados por tres barras unidas al cuerpo central que soportaran el peso de la placa junto con la carga de pago.



Figura 45: Soportes para accesorios.

Para realizar el análisis estructural a las barras se realizará una prueba de tracción aplicando una presión igual a la carga máxima en cada cara para logra una mejor distribución del peso en la superficie del soporte.

Debido a los agujeros que tiene en ambas caras para las uniones atornilladas se realizara del mismo método que con el tren de aterrizaje. Por la parte superior se impondrá la condición de empotramiento mientras que por la parte inferior se aplicara una presión correspondiente a la carga de cada barra.

El cálculo se realizara mediante las siguientes expresiones:

$$A_c = \pi \cdot (r_e^2 - r_i^2) \quad (8)$$

Donde:

- $A_c$  es el área de la cara de los soportes.
- $r_e$  es el radio exterior del soporte. Su valor es 3.53mm.
- $r_i$  es el radio interior del soporte. Su valor es 2.5mm.

Por tanto,

$$A_c = 19.53 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

La presión aplicada en cada cara del soporte se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_c = \frac{M_c \cdot g}{A_c} \quad (9)$$

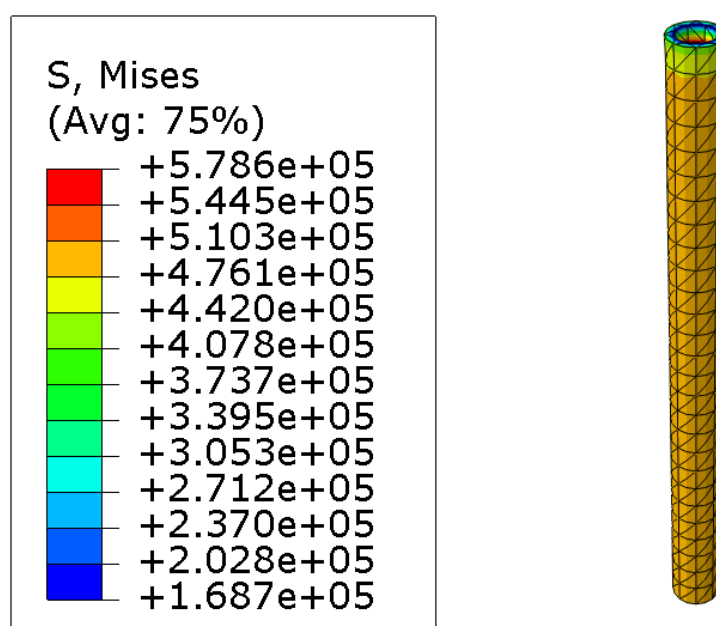
Donde:

- $P_c$  es la presión en la cara inferior del soporte.
- $M_c$  es la cantidad de masa máxima que aguantara cada soporte. Su valor es 1kg.
- $A_c$  es el área de la cara de los soportes. Su valor es  $19.53 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ .

Por tanto,

$$P_c = 501676.5 \text{ Pa}$$

Se han obtenido los siguientes resultados:



*Figura 46: Análisis de tensión máxima de Von Misses para los soportes.*

Para asegurar la integridad estructural de los soportes la tensión de Von Mises en cualquier punto debe ser menor que la tensión admisible resultante de aplicar un coeficiente de seguridad de 1.2 al límite elástico calculado con anterioridad. Su valor es 21.67MPa.

Se comprueba que el valor máximo de la tensión de Von Misses tiene un valor de 0.58 MPa y se encuentra en las uniones. Por lo tanto los soportes son capaces de cumplir la función de transportar un equipo de hasta 3 kg de peso.

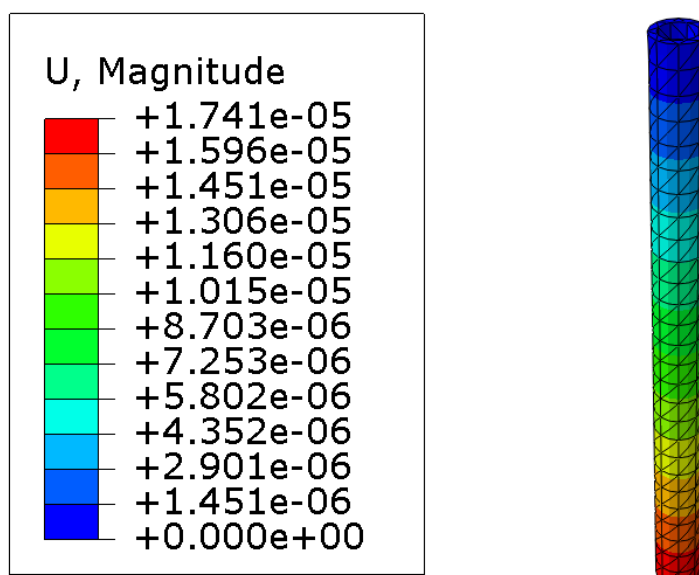


Figura 47: Análisis de desplazamiento máximo para los soportes.

Mediante el análisis de desplazamiento se observa que el material apenas sufre deformación. La deformación máxima se produce en la zona inferior y su valor es de 0.017mm.

El sistema para el transporte de carga de pago ensamblado tiene la siguiente disposición:

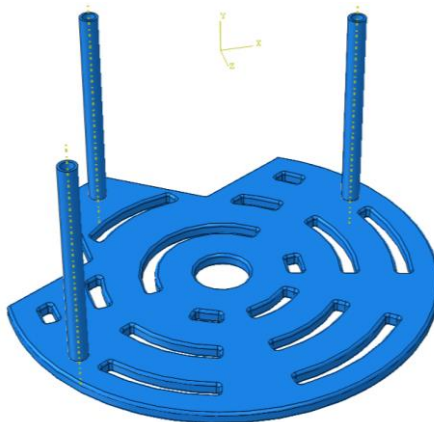
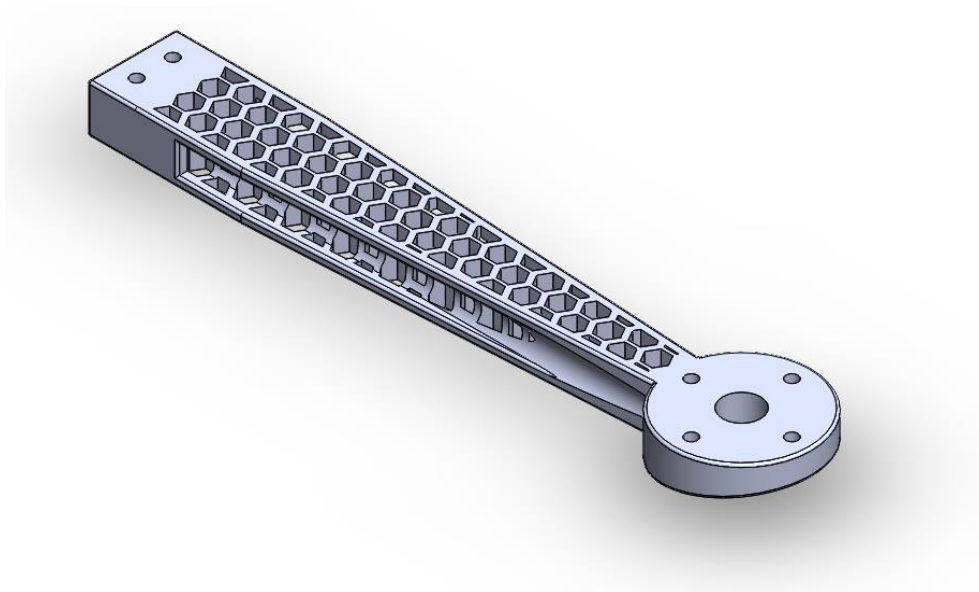


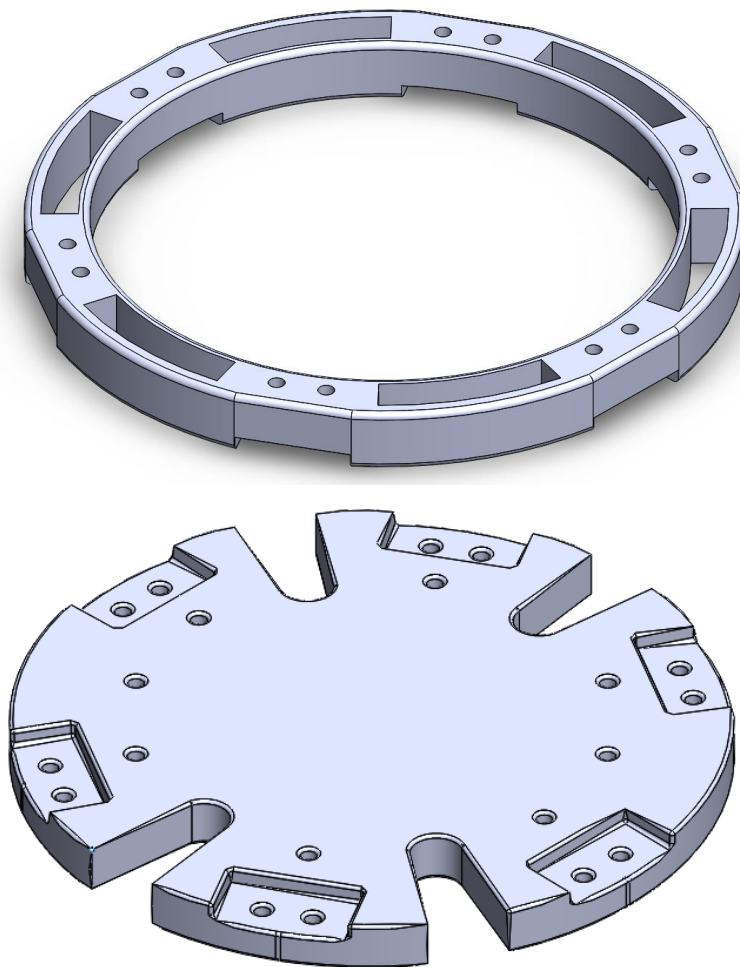
Figura 48: Sistema para el transporte de carga de pago.

## 6.6 ENSAMBLAJE

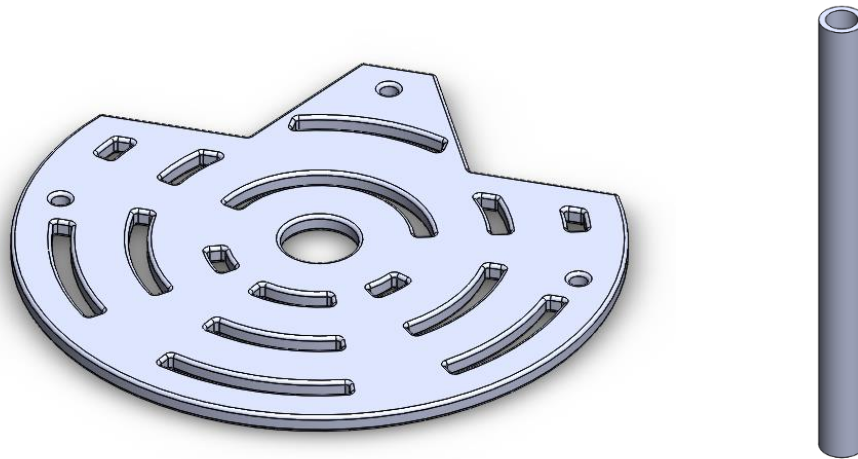
Una vez que todas las piezas han sido analizadas mediante Abaqus se procede a su ensamblaje en el programa Solidworks. Este programa CAD se utilizará para realizar el diseño en detalle de las piezas y darle una mejor presentación al proyecto.



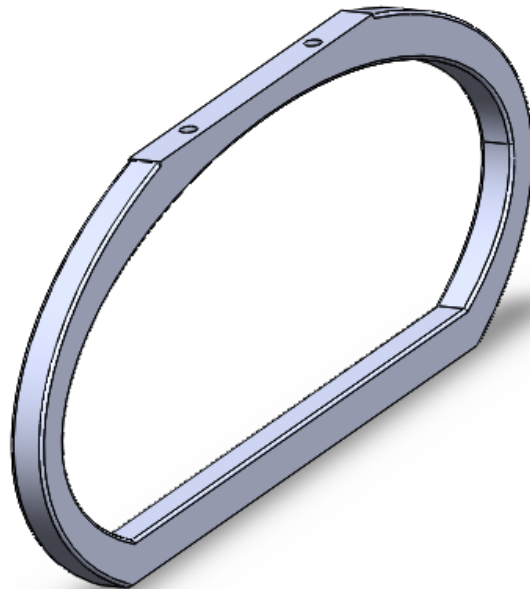
*Figura 49: Diseño del brazo en SolidWorks.*



*Figura 50: Diseño del cuerpo central en SolidWorks.*

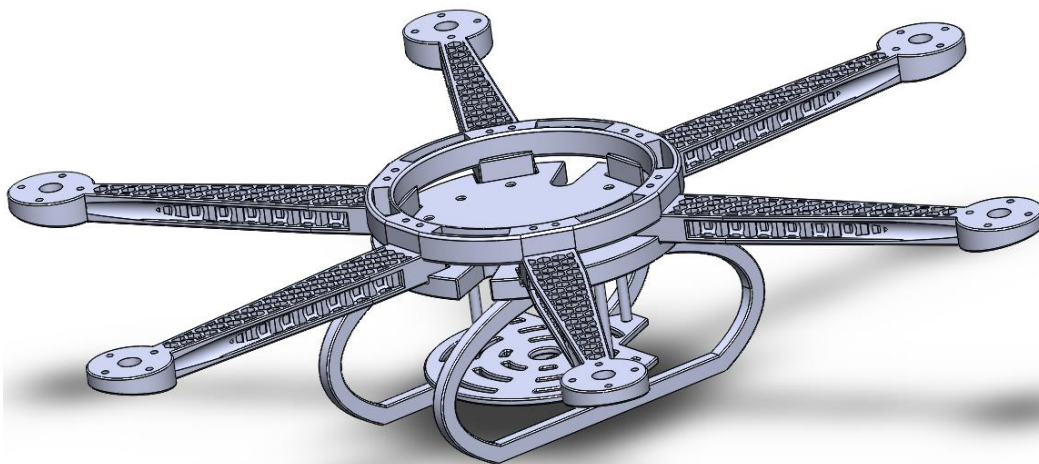
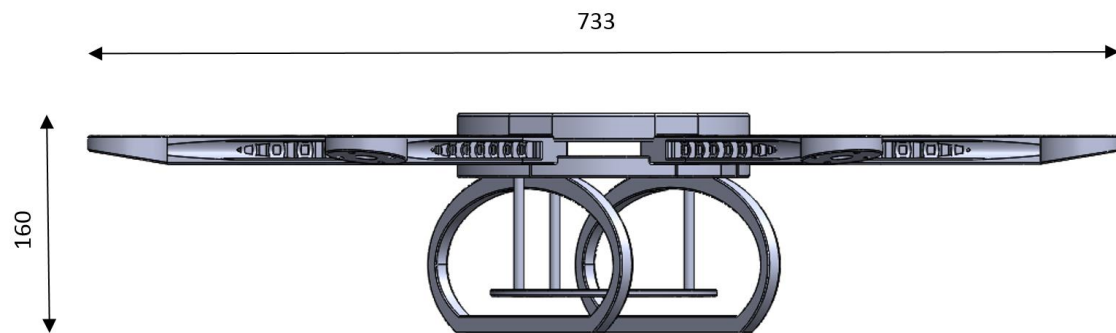


*Figura 51: Diseño del soporte para accesorios en SolidWorks.*



*Figura 52: Diseño del tren de aterrizaje en SolidWorks.*







*Figura 53: Diseño del ensamblaje en SolidWorks.*

## CAPITULO 7.

# MOTOR.

En este capítulo se explicará el funcionamiento del motor de un dron, sus componentes y como se lleva a cabo la elección en base a la cantidad de peso que se desea levantar.

### 7.1 EL MOTOR BRUSHLESS

Los motores brushless (sin escobillas) son motores eléctricos que no emplean escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor. Por el contrario, en los motores eléctricos convencionales, las escobillas ejercen un rozamiento que hacen que disminuya de gran forma su rendimiento.

Los motores eléctricos brushless, en vez de funcionar mediante corriente continua funcionan en corriente alterna. La mayoría de los motores brushless se alimentan con una señal trifásica en forma de pulsos mediante la ayuda de un variador o ESC que transforma la corriente continua en corriente alterna a una determinada frecuencia para darle la velocidad apropiada en cada momento, según la decisión del controlador de vuelo.

Los motores brushless permiten conseguir un gran rendimiento y una gran potencia a cambio de un gran consumo. Debido a esto, se debe utilizar LiPo (Polímero de litio), que son baterías con poca densidad de energía en comparación con otras, pero que pueden entregar una alta cantidad de potencia.

Los motores brushless Outrunner son los motores eléctricos más usados en aerodelismo. Su nombre se debe a que hace girar su carcasa. Los Outrunners giran mucho más lento que los Inrunner, pero tienen mucho más torque.

Los motores brushless Inrunner deben su nombre al hecho de que su núcleo de rotación está contenido dentro del motor, al igual que en los motores de escobillas.



Es importante saber cuál es el valor más alto de la corriente cuando el acelerador se encuentra al máximo. Este dato también aparece en la ficha técnica y determina los variadores o ESC que se debe usar.

#### **Agujeros:**

El acotamiento de las medidas del motor es esencial para establecer el tamaño y la posición de los agujeros de anclaje del motor.

Mediantes estos datos técnicos del motor se dispone de mucha más información para conseguir que el dron pueda volar correctamente sin problemas de empuje o aceleración. Para el correcto mantenimiento de los motores se recomienda que el dron sea capaz de levantar el doble de su peso.

### 7.3 HÉLICES

La elección del motor va ligeramente relacionada con la elección de las hélices que se desea incorporar. Dependiendo de la hélice y las celdas de la batería se obtendrá un mayor o menor empuje utilizando el mismo motor. Se debe tener en cuenta que un motor de mayor potencia tendrá un consumo mayor, y por lo tanto menor tiempo de vuelo.

En el mercado hay hélices de diferentes tamaños y materiales para cada tipo de multirroto. Las más comunes son las de compuesto de nylon o ABS, también hay de fibra de carbono aunque son bastante más caras. El tamaño de la hélice de un motor es muy importante. Una hélice más grande proporcionara más velocidad y estabilidad.

Las hélices llevan impreso un número que aporta información sobre sus características. El primer dígito hace referencia a la longitud de la hélice en pulgadas y el segundo es el pitch o paso de la hélice. El paso de hélice es la distancia que recorre una hélice en una vuelta completa.

De este modo, una hélice con mayor pitch y misma longitud o una hélice de longitud mayor y mismo pitch hará que nuestro dron vaya más rápido pero también hará que el motor consuma más amperios. Antes de aumentar la hélice se aconseja consultar las especificaciones y el test de empuje de los motores para saber si aguantarán. También se debe consultar los amperios que demandará el motor ya que puede ser posible que las baterías y los variadores no puedan proporcionarlos.

Finalmente se pueden sacar las siguientes conclusiones sobre la elección del tipo de hélice y el comportamiento que tendrá en el motor:

- Cuanto más grande sea la hélice, mayor capacidad de empuje y mayor velocidad se puede alcanzar con el dron.
- Cuanto mayor sea el paso, mayor recorrido hace en una vuelta y más velocidad podrá alcanzar el dron. El empuje de mayor cantidad de aire puede provocar pérdida de estabilidad en la aeronave.
- Las hélices de fibra de carbono son más rígidas, hacen menos ruido, los movimientos son más precisos y aguantan mejor las rozaduras. Son las hélices que se utilizan en drones profesionales y, debido a su calidad, son las más caras.

Por último, se recomienda controlar la temperatura del motor la primera vez que se aumente el tamaño de la hélice.



*Figura 55: Hélices de fibra de carbono [21]*

## 7.4 SELECCIÓN DE MOTOR Y HÉLICES

Como se ha comentado en otros apartados, el empuje necesario para mantener el dron en el aire según el objetivo marcado será de 2kg por motor en las condiciones más exigentes. Para ello se deberá encontrar un motor que aporte como mínimo este empuje con un tamaño de hélice admisible debido a que si son demasiado grandes podrían chocar entre sí debido a la distribución hexagonal de los motores.

El motor seleccionado es el siguiente:

Motor Brushless Leopard LC 3542-6T 920kv

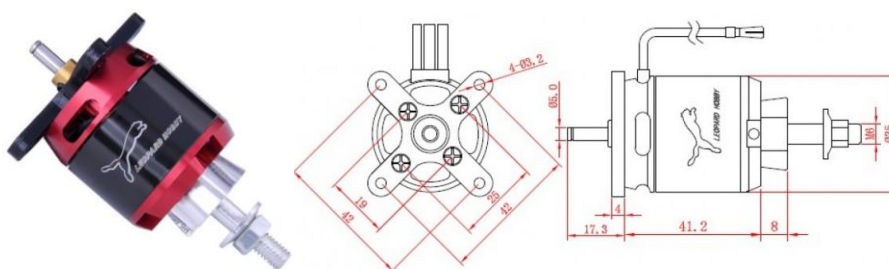


Figura 56: Motor leopard 3542-6T[22]

Tabla 3: Especificaciones técnicas motor Leopard LC-3542-6T [3]

Model	KV(RPM/Volt)	No-Load Current (7.4V)	Lipo Cell	Max Permissible Current(A)	Running Current(A)	Resistance	Dia. x Length (mm)	Length of Extend Shaft	Shaft Dia. (mm)	Weight	Power	Pull	Prop Size
LC3542-6T	920KV	2.3A	3-4S	45A	<42	0.0393	35.0×41.2	17MM	5.0	135g	620W	2.2kg	11"-12"

Observando la tabla de especificaciones se comprueba que el motor proporciona un empuje de 2,2kg con unas hélices de 12". Una vez elegidos el motor y el tamaño de hélice se puede realizar una simulación de vuelo para obtener el resto de componentes como los variadores y la batería ya que dependen del consumo del motor para un determinado tipo de hélice.

## CAPITULO 8.

# UNIONES.

El dron está diseñado por varios elementos que deben estar unidos entre sí. Esto se debe a que el sistema de fabricación no permite la impresión del dron completo. Para ello, se deben utilizar uniones atornilladas.

Las características de este tipo de unión son las siguientes:

- Instalación fácil y rápida.
- Posibilidad de desmontar y volver a montar fácilmente.
- Elementos normalizados.
- Bajo coste

Debido a sus características la unión atornillada es la mejor elección para ensamblar las partes del dron debido a que permite el intercambio de piezas, como los accesorios o un elemento que se debe reparar. La unión atornillada está diseñada para que se produzca antes el fallo en la pieza que en la propia unión.

Los modos de fallo que se pueden producir son los siguientes:

**Fallo por tracción:** Si la tensión normal es mayor a la tensión admisible del material, la unión se romperá. Se puede aumentar la resistencia de la unión aumentando el diámetro o añadiendo más tornillos.

**Slipage:** Este fenómeno se produce cuando en el vástago, las piezas unidas tratan de deslizarse una con respecto a la otra. Si la tensión por cortadura en el tornillo es superior a la tensión admisible del material, la unión se romperá por la sección sometida a cortadura.

**Gapping:** Se trata del espaciamiento que se produce entre las piezas a unir, debido a la falta de fuerza en dicha unión.

Para realizar la comprobación de las uniones según los distintos modos de fallo se ha utilizado una herramienta diseñada en Microsoft Excel. Ésta herramienta es capaz de calcular el coeficiente de seguridad de cada modo de fallo mediante una entrada de datos según se indica a continuación:

1. Fuerza producida en cada unión.
2. Datos del tornillo (diámetro, área de estrés, diámetro de la cabeza, límite elástico, límite de rotura y módulo de elasticidad del material).
3. Datos del material de las piezas a unir (límite elástico, límite de rotura y módulo de elasticidad del material y espesores).



Una vez introducida la información necesaria para cada unión, la herramienta calculará los coeficientes de seguridad mediante las siguientes expresiones:

$$MOS_{GAPPING} = \frac{P_{MINIMO}}{(1 - nK_3)F_T} - 1$$

$$MOS_{SLIPPAGE} = \frac{Q_{ALLOWABLE}}{Q} - 1$$

$$MOS_{BOLT\ ULT\ AXIAL} = \frac{\sigma_{ULT} \cdot A_S}{P_{MAXIMO} + K_3 \cdot F_T} - 1$$

Donde:

$$P_{nominal} = K_1 \times \sigma_{Yield} \times A_{stress} \quad K_1 = 0.65$$

$$P_{Maximo} = 1.15 \times P_{nominal}$$

$$P_{Minimo} = 0.85 \times P_{nominal}$$

$$T_{Apriete} = K_2 \times P_{nominal} \times \Phi_{tornillo}$$

$$K_2 = 0.14 - \sin - Oil$$

Dentro del proyecto se diferenciarán cuatro tipos de uniones atornilladas:

#### Unión motor-brazo:

La unión de los motores a los brazos se realiza mediante cuatro tornillos de 5mm de diámetro. Esta unión está formada por dos superficies, la placa de acero a la que se encuentra unido el motor y el brazo. El empuje producido por el motor deberá repartirse entre el número de tornillos.

Como se ha explicado con anterioridad, el giro de las hélices provoca un par en el brazo, creando una fuerza lateral respecto al eje longitudinal del tornillo. De un modo conservador se tomará como fuerza lateral el mismo valor que produce el empuje del motor en cada tornillo. Por lo tanto:

$$F_{AXIAL} = F_{LATERAL} = 4.9N$$

### Unión brazo-cuerpo:

Cada unión del brazo con el cuerpo central estará formada por dos tornillos de 5mm de diámetro. Se trata de una unión formada por tres superficies, dos pertenecientes al cuerpo central y una perteneciente al brazo. De un modo conservador se tomará como fuerza lateral el mismo valor que produce el empuje del motor en cada tornillo. Por lo tanto:

$$F_{AXIAL} = F_{LATERAL} = 9.8N$$

### Unión soportes-cuerpo-bandeja:

La unión del cuerpo central con la bandeja porta-accesorios estará formada por tres tornillos de 5mm de diámetro. El sistema de dicha unión consta de 3 elementos; el cuerpo central, el soporte y la placa. En este caso solo existe esfuerzo axial por parte del tornillo, correspondiente al peso máximo estimado para la carga de pago. Su valor 3kg, por tanto:

$$F_{AXIAL} = 9.8N$$

### Unión tren de aterrizaje-cuerpo:

La unión del tren de aterrizaje se realiza mediante cuatro tornillos de 5mm de diámetro. Debido al mínimo esfuerzo axial que produce el peso del tren de aterrizaje sobre el dron comparado con la unión de los soportes, no se realizará el estudio de esta unión. Su justificación se basará en el resultado de la unión del soporte con el cuerpo central.

Tabla 4: Análisis de las uniones

ANÁLISIS UNIONES			
UNION	MOTOR-BRAZO	BRAZO-CUERPO	CUERPO-ACCESORI
AXIAL (N.)	4,9	9,8	9,8
RES. LAT. (N.)	4,9	9,8	0
DATOS TORNILLO		ACERO	
DIAMETRO TORNILLO (mm)	5	5	5
STRESS AREA (mm <sup>2</sup> )	37,11	37,11	37,11
DIAMETRO CABEZA DEL TORNILLO (mm)	8,5	8,5	8,5
RESISTENCIA A YIELD (N/mm <sup>2</sup> )	900	900	900
RESISTENCIA A ULTIMATE (N/mm <sup>2</sup> )	1000	1000	1000
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	210000	210000	210000
ADMISIBLE A CORTADURA DEL TORNILLO (N/mm <sup>2</sup> )	519,6	519,6	519,6
GROUND PLANE		ABS-M30	
RESISTENCIA A YIELD (N/mm <sup>2</sup> )	26	26	26
RESISTENCIA A ULTIMATE (N/mm <sup>2</sup> )	36	36	36
MODULO ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	2400	2400	2400
HERRAJE ARM. CONVERTIDOR		ACERO/ABS-M30	
MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm <sup>2</sup> )	210000	2400	2400
SECCION BRUTA (mm <sup>2</sup> )	900	1600	22500
SECCION NETA (mm)	750	1400	21750
LONGITUD DEL HERRAJE (mm)	30	40	150
PRETENSION NOMINAL (N)	21709,35	21709,35	21709,35
PRETENSION MINIMA DEL TORNILLO (N)	18452,9475	18452,9475	18452,9475
PRETENSION MAXIMA DEL TORNILLO (N)	24965,7525	24965,7525	24965,7525
MAXIMA CORTADURA DE LA UNION (N)	2767,942125	2767,942125	2767,942125
ESPESOR GROUND PLANE (mm)	4	30	15
ESPESOR HERRAJE ARMARIO (mm)	30	40	150
RELACION DE RIGIDECES K3	0,848214066	0,977653594	0,977653594

Tabla 5: Resultado del análisis de las uniones.

UNION	MOS GAPPING	MOS SLIPPAGE	MOS TRACCION
MOTOR-BRAZO	>2	>2	>0
BRAZO-CUERPO	>2	>2	>0
CUERPO-SOPORTE	>2	>2	>0

De los resultados obtenidos se pueden sacar las siguientes conclusiones:

**MOS GAPPING:**

Relaciona la pretensión mínima del tornillo con la fuerza ejercida sobre el mismo. Se observa que la fuerza requerida para que se produzca el gapping es mucho mayor que la fuerza ejercida sobre el tornillo en todas las uniones, por lo tanto, se pueden considerar como válidas este tipo de uniones.

**MOS SLIPAGGE:**

Relaciona el deslizamiento permitido con el deslizamiento ejercido sobre la unión. Se observa que la fuerza requerida para que se produzca el deslizamiento es mucho mayor que la fuerza ejercida sobre el tornillo. En el caso del cuerpo, al no existir esfuerzo lateral, se elimina el deslizamiento producido. De acuerdo con el coeficiente de seguridad para el slippage, las uniones realizadas se pueden considerar válidas.

**MOS TRACCION:**

Relaciona la fuerza rotura del tornillo con la pretensión mínima y la fuerza ejercida sobre el tornillo. Observando los resultados se puede afirmar que no se alcanza el valor para que se produzca la rotura del tornillo. Por lo tanto, las uniones se consideraran como válidas.

## CAPITULO 9.

# SIMULACIÓN DE VUELO.

Para realizar la simulación de vuelo se ha utilizado la página web ecalc. Esta página contiene una gran base de datos sobre aviones, helicópteros y multirrotores que permite estimar con gran precisión los tiempos de vuelo de las aeronaves además de sus consumos y demás parámetros técnicos. En este capítulo se elegirá la configuración electrónica que permita al dron maximizar el tiempo de vuelo.

Para poder simular las condiciones de vuelo, ecalc necesita información sobre el dron que se pretende analizar.

Primero se necesita información del tipo de dron como el número de motores, el peso de la estructura, la envergadura e incluso condiciones meteorológicas y de vuelo. En este caso, las necesidades del dron establecen en tipo de motor que se necesita según el empuje necesario, únicamente hace falta elegir el motor de la base de datos junto con el tamaño de las hélices.

A continuación se debe seleccionar el tipo de batería y el variador necesarios compatibles con los elementos ya seleccionados. Se ha seleccionado una batería LiPo de 22000mAh-15/25C con una configuración 3S 1P. El significado de la nomenclatura es el siguiente:

- 15/25C corresponde a la tasa de descarga de la batería, en este caso la batería tolera 15 C de forma constante mientras que de forma puntual puede tolerar 25C. En las baterías C es una medida de carga o descarga. Si una batería es 1C, se carga/descarga una batería por hora (1/h).
- 3S 1P corresponde a la configuración de la batería. La S corresponde a los elementos en serie, por lo tanto, 3 elementos de 3.7V en serie corresponden a 11.1V en total. La P corresponde a los elementos en paralelo. Al ser 1P serían 22000mAh.

Estas configuraciones en las baterías permiten sumar voltios o amperios en función de las necesidades de la motorización.

Para finalizar se realiza la elección del variador, en este caso se elige un variador del tipo MAX30 A debido a que la corriente es de 27.44A

Una vez realizada la simulación se obtienen los siguientes parámetros y curvas de consumo del motor.

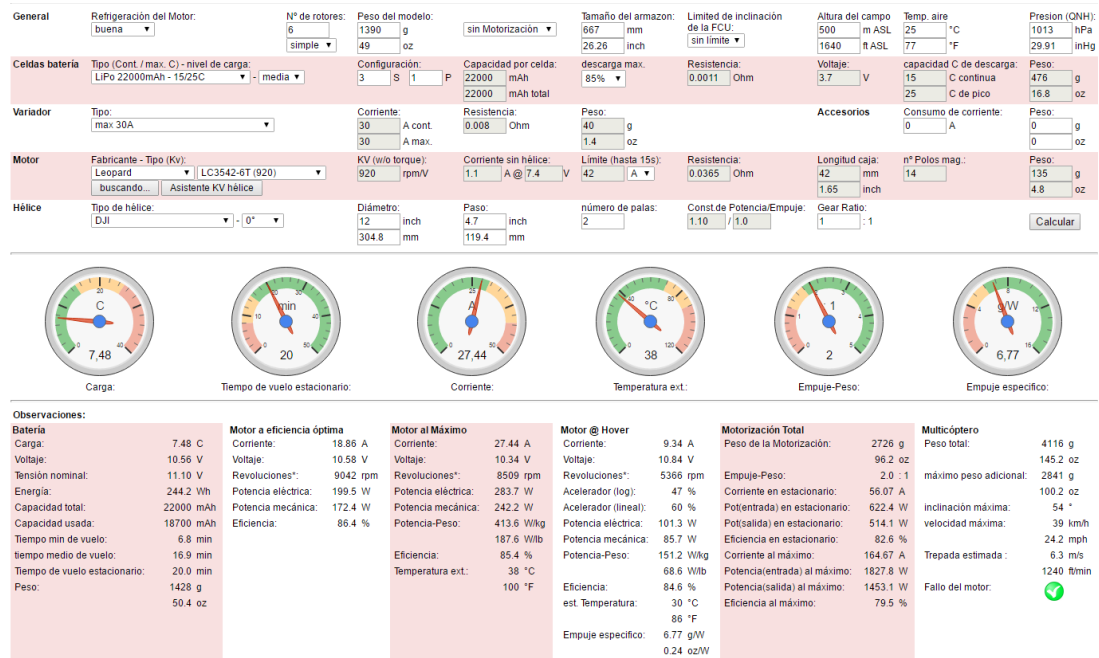
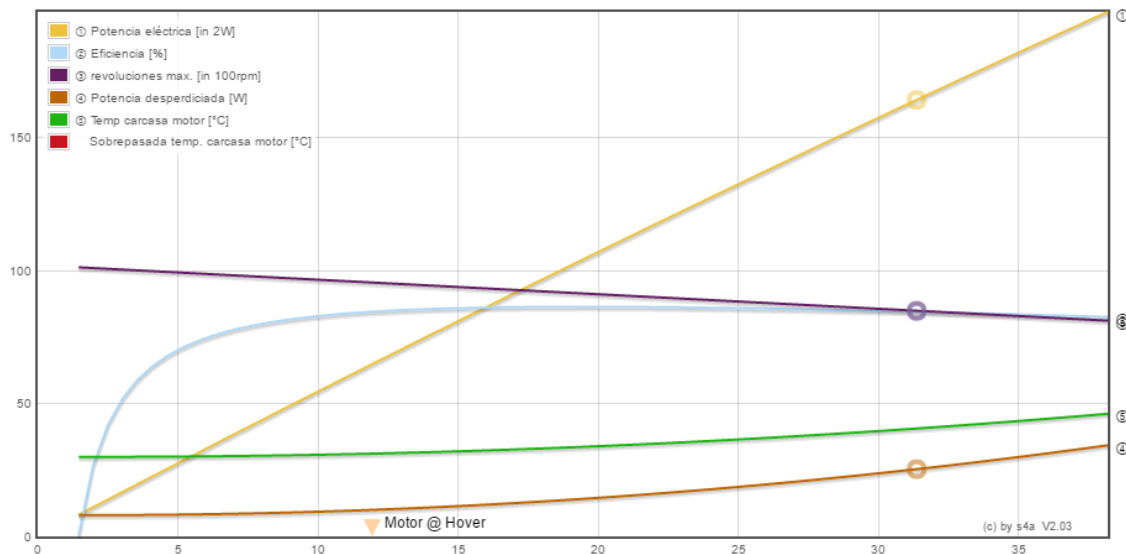


Figura 57: Simulación mediante Ecalc[23]

En el siguiente grafico se representan algunos parámetros relevantes sobre el funcionamiento del motor, confirmando que funciona correctamente manteniendo las condiciones de seguridad.

Figura 58: Características del motor en servicio [24]



## CAPITULO 10.

# CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

El dron multirroto se ha diseñado mediante un proceso de optimización y fabricado a través de tecnología aditiva para mantener en el aire un peso de 6kg en condiciones seguras.

El peso final del dron incluyendo la motorización y el sistema porta-accesorios es de 4.116kg. El máximo peso adicional es de 2.841kg siendo limitado por la motorización, por lo tanto, no se recomienda que el peso total del dron sea mayor de 6.957kg.

El tiempo máximo de vuelo estacionario es de 20 minutos sin carga adicional y el tiempo de vuelo con máxima carga es de hasta 7 minutos.

### **Características:**

- Ligero, fuerte y estable.
- Altamente portátil, fácil de llevar.
- Bajo coste.
- Piezas intercambiables, fácil sustitución de piezas dañadas.
- Imprimible en 3D el 100% de la estructura.
- Calidad profesional.
- Amplia gama accesorios.
- Tren de aterrizaje con amortiguación.
- Mayor potencia.
- Diseño innovador optimizado.

Tabla 6: Especificaciones técnicas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
Multicóptero		Motor a eficiencia óptima	
Estructura:	Hexarrotor	Corriente	18.86A
Material:	ABS-M30	Voltaje	10,58V
Peso estructura:	1390g	Revoluciones	9042rpm
Peso motorización:	2726g	Potencia eléctrica	199.5W
Peso total:	4116g	Potencia mecánica	172.4W
Altura:	160mm	Eficiencia	86,40%
Envergadura:	733mm	Motor al máximo	
Refrigeración:	Buena	Corriente	27.44A
Máximo peso adicional:	2841g	Voltaje	10,34V
Inclinación máxima:	54°	Revoluciones	8509rpm
velocidad máxima:	39km/h	Potencia eléctrica	283.7W
Trepada estimada :	6.3m/s	Potencia mecánica	242.2W
Batería		Eficiencia	85.40%
Configuración:	3S 1P	Temperatura exterior	38°C
Carga:	7.48C	Motorización Total	
Voltaje:	10,56V	Peso de la Motorización:	2726g
Tensión nominal:	11,10V	Empuje-Peso:	2 : 1
Energía:	244.2Wh	Corriente en estacionario:	56.07A
Capacidad total:	22000mAh	Pot(entrada) en estacionario:	622.4W
Descarga máx.	85%	Pot(salida) en estacionario:	514W
Capacidad usada:	18700mAh	Eficiencia en estacionario:	82.6%
Tiempo min de vuelo:	6.8min	Corriente al máximo:	164.67A
tiempo medio de vuelo:	16.9min	Potencia(entrada) al máximo:	1827.8W
Tiempo de vuelo estacionario:	20.0min	Potencia(salida) al máximo:	1453.1W
Peso:	1428g	Eficiencia al máximo:	79.5%





*Figura 59: Diseño del dron en Solidworks*

## Parte Tercera

### CAPITULO 11.

## ANÁLISIS ECONÓMICO.

Para poder mostrar el coste del proyecto total, el presupuesto se desglosara en dos capítulos:

### 11.1 PRESUPUESTO DEL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Este diseño será desarrollado por una sola persona. En total, el proyecto se ha estimado en 300 horas correspondiente a 12 créditos ECTS de 25 horas cada uno. El coste total del trabajador se desglosa a continuación:

*Tabla 7: Presupuesto del trabajador.*

Titulación	Tiempo estimado	Coste/Hora	Coste estimado
Ingeniero Mecánico	300 Horas	50,00€/Hora	15.000,00 €
IVA	N/A	21%	3.150,00 €
Total			18.150,00 €

## 11.2 PRESUPUESTO DE COMPONENTES

Para realizar la construcción del dron se realizara una lista de los componentes utilizados donde se podrá ver su coste en euros a continuación:

*Tabla 8: Presupuesto de los componentes.*

Componentes	Precio	Unidades	Coste
HBP LiPo 3,7 v 22000mah batería para avión helicóptero 3S	137,07 €	1	137,07 €
ESC Variador profesional Hobbywing SkyWalker 40 A Brushless	14,49 €	6	86,94 €
Motor Leopard -LC3542-6T	28,27 €	6	169,62 €
Controlador de vuelo Openpilot CC3D	35,00 €	1	35,00 €
Bobina de filamento ABS-M30 3mm negro 1kg	15,95 €	2	31,90 €
Emisora de radio Flysky FS-T4B 2.4GHZ 4CH. MODO 2	49,00 €	1	49,00 €
Impresora 3D BQ Prusa i3 Hephestos	499,90 €	1	499,90 €
DJI Juego de 6pcs de Hélice de 12"	7,89 €	1	7,89 €
Tornillería	0,36 €	43	15,50 €
<b>Total</b>			<b>1.032,82 €</b>

## 11.3 PRESUPUESTO TOTAL

Sumando todos los presupuestos desglosados, se obtiene el presupuesto total del proyecto según figura en la siguiente tabla:

*Tabla 9: Presupuesto total del proyecto.*

Concepto	Coste estimado
Presupuesto de diseño de la estructura	18.150,00 €
Presupuesto de componentes	1.032,82 €
<b>Total</b>	<b>19.182,82 €</b>

Debido al proceso de fabricación elegido, se realizarán fabricaciones en series de 100 unidades. El precio de cada unidad mediante la fabricación en serie se realizará mediante el mismo procedimiento.

Para acelerar el proceso se utilizarán 5 impresoras 3D cuyo coste se incluye en el siguiente presupuesto.

*Tabla 10: Presupuesto componentes en serie*

Componentes	Precio	Unidades	Coste
HBP LiPo 3,7 v 22000mah batería para avión helicóptero 3S	137,07 €	100	13.707,00 €
ESC Variador profesional Hobbywing SkyWalker 40 A Brushless	14,49 €	600	8.694,00 €
Motor Leopard -LC3542-6T	28,27 €	600	16.962,00 €
Controlador de vuelo Openpilot CC3D	35,00 €	100	3.500,00 €
Bobina de filamento ABS-M30 3mm negro 1kg	15,95 €	200	3.190,00 €
Emisora de radio Flysky FS-T4B 2.4GHZ 4CH. MODO 2	49,00 €	100	4.900,00 €
Impresora 3D BQ Prusa i3 Hephestos	499,90 €	5	2.499,50 €
DJI Juego de 6pcs de Hélice de 12"	7,89 €	100	789,00 €
Tornillería	0,36 €	4300	1.530,80 €
<b>Total</b>			<b>557,72 €</b>

*Tabla 11: Presupuesto total del proyecto en serie.*

Concepto	Coste estimado
Presupuesto de diseño de la estructura	181,50 €
Presupuesto de componentes	557,72 €
<b>Total</b>	<b>739,22 €</b>



## ANEXO

---

1. Índice de figuras
2. Índice de tablas
3. Bibliografía
4. Bibliografía de imágenes
5. Bibliografía de tablas

## 1. Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo metodología de trabajo. ....	5
Figura 2: Dron multirrotor [1] .....	6
Figura 3: Disposición dron multirrotor [2] .....	8
Figura 4: Rotaciones dron multirrotor [3].....	9
Figura 5: Partes de un dron multirrotor [4] .....	11
Figura 6: Tipos de dron multirrotor [5] .....	13
Figura 7: Especificaciones técnicas Align M690L.[6] .....	15
Figura 8:Align M690L[7] .....	15
Figura 9:DJI S900[9] .....	16
Figura 10: Especificaciones técnicas DJI S900[8].....	17
Figura 11: Proceso de estereolitografía [12] .....	21
Figura 12: Proceso de sinterización selectiva por laser.[13] .....	22
Figura 13: Proceso de deposición por material fundido [14] .....	23
Figura 14: Ejemplo de tren de aterrizaje [15] .....	24
Figura 15: Ejemplo de accesorios [16] .....	25
Figura 16: Consideraciones del diseño FDM [17] .....	27
Figura 17: Pandeo, comado y esquinas FDM [18] .....	29
Figura 18: Roscados y piezas relacionadas FDM [19] .....	29
Figura 19: Pantalla principal Abaqus CAE [10].....	34
Figura 20: Proceso de vaciado.....	35
Figura 21: Esfuerzo estructura hexagonal [11] .....	36
Figura 22: Viga empotrada con carga en el extremo. ....	38
Figura 23: Mallado estructura sobre el elemento a analizar. ....	39
Figura 24: Resultados de tensión y desplazamiento .....	41
Figura 25: Resultado del proceso de optimización.....	42
Figura 26: Comparación de la sección de la viga inicial y optimizada. ....	43
Figura 27: Comparación lateral viga inicial y optimizada.....	44
Figura 28: Viga optimizada.....	44
Figura 29: Viga optimizada.....	45
Figura 30: Incorporación de soportes para uniones.....	45
Figura 31: Sistema de cargas aplicado. ....	46
Figura 32: Mallado estructural.....	47
Figura 33: Análisis tensión Von Mises en el brazo.....	47
Figura 34: Análisis de máximo desplazamiento en el brazo. ....	48
Figura 35: Cuerpo central. ....	49
Figura 36: Corte se simetría sobre el cuerpo central. ....	51
Figura 37: Resultados cuerpo central. ....	52

Figura 38: Resultados cuerpo central auxiliar. ....	53
Figura 39: Tren de aterrizaje. ....	54
Figura 40: Análisis de tensión de Von Mises en el tren de aterrizaje. ....	55
Figura 41: Análisis de máximo desplazamiento en el tren de aterrizaje. ....	56
Figura 42: Placa para accesorios. ....	57
Figura 43: Análisis de tensión máxima de Von Mises en la placa de accesorios. ....	57
Figura 44: Análisis de máximo desplazamiento de la placa de accesorios. ....	58
Figura 45: Soportes para accesorios. ....	58
Figura 46: Análisis de tensión máxima de Von Mises para los soportes. ....	60
Figura 47: Análisis de desplazamiento máximo para los soportes. ....	61
Figura 48: Sistema para el transporte de carga de pago. ....	61
Figura 49: Diseño del brazo en SolidWorks. ....	62
Figura 50: Diseño del cuerpo central en SolidWorks. ....	63
Figura 51: Diseño del soporte para accesorios en SolidWorks. ....	64
Figura 52: Diseño del tren de aterrizaje en SolidWorks. ....	64
Figura 53: Diseño del ensamblaje en SolidWorks. ....	66
Figura 54: Motor Brushless.[20].....	68
Figura 55: Hélices de fibra de carbono [21] .....	70
Figura 56: Motor leopard 3542-6T[22] .....	71
Figura 57: Simulación mediante Ecalc[23] .....	78
Figura 58: Características del motor en servicio [24] .....	78
Figura 59: Diseño del dron en Solidworks .....	81



## 2. Índice de tablas

<b>Tabla 1: Comparación de materiales [1]</b> .....	19
<b>Tabla 2: Propiedades mecánicas ABS-M30 [2]</b> .....	20
<b>Tabla 3: Especificaciones técnicas motor Leopard LC-3542-6T [3]</b> .....	71
<b>Tabla 4: Análisis de las uniones</b> .....	75
<b>Tabla 5: Resultado del análisis de las uniones.</b> .....	75
<b>Tabla 6: Especificaciones técnicas</b> .....	80
<b>Tabla 7: Presupuesto del trabajador</b> .....	82
<b>Tabla 8: Presupuesto de los componentes</b> .....	83
<b>Tabla 9: Presupuesto total del proyecto</b> .....	83
<b>Tabla 10: Presupuesto componentes en serie</b> .....	84
<b>Tabla 11: Presupuesto total del proyecto en serie</b> .....	84



### 3. Bibliografía

**Introducción y tipos de drones** :“Drones”, *Tecnología*, Disponible en: <http://www.areatecnologia.com/aparatos-electronicos/drones.html>[Consulta: 12 Abril 2016]

**Funcionamiento multirrotor**: TOGLEFRITZ,“ The Physics of Quadcopter Flight”, Black Tie Aerial, Abril 2014[En línea]. Disponible en: <http://blacktieaerial.com/the-physics-of-quadcopter-flight/> [Consulta: 17 Abril 2016]

**Partes de un multirrotor**: C.FARIA,“ Construye tu dron”,*Dron Center*,Marzo 2015[En línea]. Disponible en: <http://dronecenter.blogspot.com.es/p/construye-tu-drone.html> [Consulta: 12 Abril 2016]

**Tipos de multirrotor**: M.GORTOLEV,“ Quadcopter vs Hexacopter vs Octocopter: The Pros and Cons”,*Dronebly*,Noviembre 2014[ En línea]Disponible en: <http://dronebly.com/quadcopter-vs-hexacopter-vs-octocopter-the-pros-and-cons> [Consulta: 12 Abril 2016]

**Materiales disponibles en el mercado**: Introducción 3D y materiales: F.GARCIA, B.LOPEZ,“ Fabricación de drones con CFRTF mediante impresión 3D”, *Congreso CivilDron16 Libro de Actas*, Enero 2016[En línea].Disponible en: <http://www.civildron.com/index.html> [Consulta: 25 Febrero 2016]

**Material elegido**: C.ESCOBAR, “ABS Y PLA: diferencias, ventajas y desventajas.”,*Blog impresoras 3D.com*,Junio 2013[En línea]. Disponible en: <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102837127-abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas> [Consulta: 22 Abril 2016]

**Procesos de fabricación Introducción a la impresión 3D, impresión 3D aplicada a drones, impresión de estructuras para drones**: Introducción 3D y materiales: F.GARCIA, B.LOPEZ,“ Fabricación de drones con CFRTF mediante impresión 3D”, *Congreso CivilDron16 Libro de Actas*, Enero 2016[En línea].Disponible en: <http://www.civildron.com/index.html> [Consulta: 25 Febrero 2016]

**Proceso de fabricación elegido:** J.MAZCUÑAN, "Guía de diseño para impresión 3D", *Repro 3D*, [En línea]. Disponible en: [http://solitium.es/Repro3D/guia/guia\\_de\\_diseno\\_para\\_impresion\\_3d\\_01\\_fdm.pdf](http://solitium.es/Repro3D/guia/guia_de_diseno_para_impresion_3d_01_fdm.pdf) [Consulta: 5 Mayo 2016]

**Elementos finitos:** CARNICERO, "Introducción al método de los elementos finitos", *Instituto de investigación tecnológica* [En línea]. Disponible en: [http://www.iit.comillas.edu/~carnicero/Resistencia/Introduccion\\_al\\_MEF.pdf](http://www.iit.comillas.edu/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf) [Consulta: 28 Mayo 2016]

**Motores, el motor brushless:** "motores brushless glow", *RC tecnic aerodelismo y radiocontrol*. Disponible en: <http://www.rctecnic.com/144-motores-brushless-glow> [Consulta: 6 Mayo 2016]

**Aspectos técnicos de los motores brushless:** "Motores para drones. Nociones básicas", Blog MaxterDrone, Enero 2016 [En línea]. Disponible en: <http://maxterdrone.com/blog/motores-para-drones-que-necesitas-saber-n18> [Consulta: 6 Mayo 2016]

**Helices para drones:** DDCSTAFF-FER, "Hélices para mini drones ¿Cuál elijo?", *Multiguía DDC*, Enero 2015 [En línea]. Disponible en: <http://dronesdecarreras.com/gemfan-5030-6030-5045-diferencias-entre-las-diferentes-helices-para-mini-quads/> [Consulta: 6 Mayo 2016]

## 4. Bibliografía de imágenes

[1] **Dron 3DR.** Disponible en: <http://beginnerflyer.com/3dr-solo-drone-review-a-complete-guide/>

[2] **Disposición dron multirroto**r. Disponible en:  
[http://www.secyt.frba.utn.edu.ar/gia/trabajosviii/jar8\\_submission\\_42.pdf](http://www.secyt.frba.utn.edu.ar/gia/trabajosviii/jar8_submission_42.pdf)

[3] **Rotaciones dron multirroto**r. Disponible en:  
<http://controlaplicado.blogspot.com.es/2015/10/concepto-preliminares-de-vuelos.html>

[4] **Partes dron multirroto**r. Disponible en: <http://dronecenter.blogspot.com.es/p/construye-tu-drone.html>

[5] **Tipos dron multirroto**r. Disponible en: <http://www.civildron.com/index.html>

[6] **Especificaciones técnicas Align M690L.** Disponible en: <http://www.hobbyreal.com/es-align-m690l-hexaco-pter-s-per-combo-rm69001xw-p237951.htm?source=ProductListAds&id=51320962143&currency=eur&country=ES&gclid=CJHbkcDn-cwCFcSRGwodqkUNhA>

[7] **Align M690L.** Disponible en: <http://www.hobbyreal.com/es-align-m690l-hexaco-pter-s-per-combo-rm69001xw-p237951.htm?source=ProductListAds&id=51320962143&currency=eur&country=ES&gclid=CJHbkcDn-cwCFcSRGwodqkUNhA>

[8] **Especificaciones técnicas DJI S900.** Disponible en: <http://www.hobbyreal.com/es-dji-s900-spreading-wings-hexaco-pter-a2-combo-p237287.htm?source=ProductListAds&id=51320962143&currency=eur&country=ES&gclid=CleUhbfncwCFUWfGwodnq0EMQ>

[9] **DJI S900.** Disponible en: <http://www.hobbyreal.com/es-dji-s900-spreading-wings-hexaco-pter-a2-combo-p237287.htm?source=ProductListAds&id=51320962143&currency=eur&country=ES&gclid=CleUhbfncwCFUWfGwodnq0EMQ>

[10] **Pantalla principal Abaqus CAE.** Disponible en:  
<https://aulaglobal.uc3m.es/mod/folder/view.php?id=1017670>

[11] **Esfuerzo estructura hexagonal.** Disponible en: <http://www.civildron.com/index.html>

[12] **Proceso de estereolitografía.** Disponible en: <http://www.civildron.com/index.html>

- [13] **Proceso de sinterización selectiva por láser.** Disponible en:  
<http://www.civildron.com/index.html>
- [14] **Proceso de deposición por material fundido.** Disponible en:  
<http://www.civildron.com/index.html>
- [15] **Ejemplo de tren de aterrizaje.** Disponible en: <http://www.civildron.com/index.html>
- [16] **Ejemplo de accesorios.** Disponible en: <http://www.civildron.com/index.html>
- [17] **Consideraciones del diseño FDM.** Disponible en:  
[http://solitium.es/Repro3D/guia/guia\\_de\\_diseno\\_para\\_impresion\\_3d\\_01\\_fdm.pdf](http://solitium.es/Repro3D/guia/guia_de_diseno_para_impresion_3d_01_fdm.pdf)
- [18] **Pandeo, combado y esquinas FDM.** Disponible en:  
[http://solitium.es/Repro3D/guia/guia\\_de\\_diseno\\_para\\_impresion\\_3d\\_01\\_fdm.pdf](http://solitium.es/Repro3D/guia/guia_de_diseno_para_impresion_3d_01_fdm.pdf)
- [19] **Roscados y piezas relacionadas FDM.** Disponible en:  
[http://solitium.es/Repro3D/guia/guia\\_de\\_diseno\\_para\\_impresion\\_3d\\_01\\_fdm.pdf](http://solitium.es/Repro3D/guia/guia_de_diseno_para_impresion_3d_01_fdm.pdf)
- [20] **Motor Brushless.** Disponible en: <https://droneflyers.wordpress.com/fpv-drone-racer-build/dys-be1806-2300kv-brushless-motor-black-edition-for-fpv-drone-racer-build/>
- [21] **Hélices de fibra de carbono.** Disponible en: <http://mktdrones.es/41-helices-carbono>
- [22] **Motor Leopard 3542-6T.** Disponible en: <http://www.myrcmart.com/leopard-lc35426t-920kv-outrunner-brushless-motor-prop-1112-p-4968.html>
- [23] **Simulación mediante Ecalc.** Disponible en: <http://www.ecalc.ch/index.htm>
- [24] **Características del motor en servicio.** Disponible en: <http://www.ecalc.ch/index.htm>

## 5. Bibliografía de tablas

[1] **Comparación de materiales.** Disponible en: <http://www.civildron.com/index.html>

[2] **Propiedades mecánicas ANS-M30.** Disponible en: <http://producto3d.com/wp-content/uploads/2015/02/Propiedades-ABS-M30-.pdf>,  
[http://www.protoline3d.com/sites/default/files/ABS-M30\\_es.pdf](http://www.protoline3d.com/sites/default/files/ABS-M30_es.pdf),  
<http://cuadernoodovago.blogspot.com.es/2012/04/valores-del-coeficiente-de-poisson-para.html>

[3] **Especificaciones técnicas motor Leopard LC-3542-6T.** Disponible en:  
<http://www.myrcmart.com/leopard-lc35426t-920kv-outrunner-brushless-motor-prop-1112-p-4968.html>