



**Universidad**  
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

# DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN CON IMPRESORA 3D, DE UN CUADRICOPTERO MODULAR.

DESIGN, CALCULATION AND MANUFACTURING WITH  
3D PRINTER, OF MODULAR QUADRICOPTER.

AUTOR:

Daniel Antonio del Caso Miguel.

DIRECTOR:

Juan Antonio Peña Baquedano.

EINA

2016



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D<sup>a</sup>. Daniel Antonio del Caso Miguel,

con nº de DNI 72991173 Y \_\_\_\_\_ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado de Ingeniería Mecánica, (Título del Trabajo)

Calculo, diseño y fabricación con impresora 3D de un Cuadricoptero modular.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 23 de Noviembre de 2016

Fdo: DANIEL ANTONIO DEL CASO MIGUEL.

## **RESUMEN**

El desarrollo del proyecto, ha comprendido las tres fases del proyecto, pero cobrando gran relevancia en la primera y la segunda fase del mismo.

En la primera fase del proyecto, nos encontramos con la problemática de describir el producto, ¿qué se va a desarrollar?, ¿con qué propósito se quiere desarrollar?, ¿para qué ámbito?, ¿qué alcance podría tener?; todas estas preguntas que forman parte de la memoria del proyecto y que son descritas antes de comenzar con el desarrollo, se terminan de definir con exactitud durante el desarrollo del mismo. Por otro lado realizar una previsión de los tiempos, que se van a invertir en cada parte del mismo es una tarea complicada y algo incierta, debido a la inexperiencia a la hora de elaborar proyectos.

Gracias al seguimiento real del proyecto, elaborado durante el tiempo que ha durado el desarrollo del mismo, se ha podido realizar una comparativa entre tiempos estimados y tiempos reales. Esto ha permitido ver la cantidad de tiempo que se necesita invertir en las diferentes partes del proyecto, así como la envergadura que tiene cada parte.

En la segunda fase del proyecto, se ha realizado una búsqueda detallada de la información que rodea a los drones y en particular de los cuadricópteros. La búsqueda de información se ha centrado en la idea a desarrollar, lo que ha permitido obtener al autor un punto de vista más amplio, obteniendo a la vez nuevos conocimientos acerca del funcionamiento de los cuadricópteros, información que ayuda a desarrollar la idea de creación del cuadricóptero modular y concretar las restricciones de diseño. También ha permitido obtener información sobre las diferentes ramas de investigación que se han desarrollado dentro de este campo y conocer el estado actual de desarrollo de los cuadricópteros, aportando información sobre cómo afecta la ley actual al uso de estas máquinas. Por otro lado, se ha comprobado el gran crecimiento que ha sufrido el mercado de componentes electrónicos, ofreciendo gran variedad de componentes; lo que ha exigido realizar una selección adecuada, orientada al uso final del producto.

Gracias a la gran inversión de tiempo realizada en la búsqueda y selección de la información, se ha podido desarrollar un producto que cumpla con los requisitos marcados.

El diseño, el cálculo y la fabricación 3D, ha comprendido toda la tercera fase del proyecto.

Comenzar con una lluvia de ideas, ha permitido plasmar en bocetos las diferentes ideas del autor, de cómo podrían ser las partes que componen el chasis-soporte del cuadricóptero; mostrando posibles variaciones de diseño del mismo y posibles modificaciones funcionales. La elección de los bocetos de partida para comenzar el diseño de las partes que componen el cuadricóptero, se realizó teniendo en cuenta las dimensiones de los componentes electrónicos seleccionados en la segunda fase.

Concretar un flujo de trabajo entre la realización de los diseños y los cálculos estáticos, ha permitido definir un chasis-soporte compacto, ligero, resistente y capaz de alojar los componentes electrónicos necesarios para el correcto funcionamiento del cuadricóptero.

A la hora de realizar los diseños, también se ha tenido en cuenta el proceso de fabricación FFF y las características de la impresora 3D empleada para crear las piezas diseñadas. Dentro del proceso FFF, ha sido determinante tener en cuenta la forma en que se construyen las piezas, siguiendo un patrón de dibujo en planta que se repite y cambia según la geometría de la pieza, dando altura a la pieza capa a capa. Esta forma de fabricar nos exige elegir un posición determinada a la hora de lanzar la construcción y que se debe tener en cuenta a la hora de definir los diseños, con el fin de obtener una resistencia a los esfuerzos adecuada. Las dimensiones máximas de impresión de la impresora 3D también se deben tener en cuenta.

Una vez concluida la parte de diseño y cálculo, se ha preparado un formato adecuado para realizar una prueba de fabricación, se han ajustado los parámetros digitales de impresión y se ha realizado un proceso de puesta a punto de la máquina. Una vez fabricada la pieza y sometida al proceso de limpieza de los soportes, se ha realizado la medición de la pieza, con el objetivo de comprobar si las dimensiones de la pieza coinciden con las dimensiones de los diseños. El resultado de las mediciones obtenidas no coincide con las medidas del diseño. Por lo que, se ha considerado oportuno realizar una segunda prueba de impresión, para comprobar si las desviaciones en las medidas de la pieza se repiten. Después de realizar la segunda medición, los resultados obtenidos son similares. Las diferencias en las medidas de la pieza fabricada con respecto a las medidas del diseño de la pieza, son debidas a desviaciones que se generan durante el proceso de construcción, por falta de precisión de la impresora 3D. Razón por la cual, se han tenido que modificar las medidas originales del diseño, en base a una tabla desarrollada, para controlar las desviaciones que se generan en las diferentes orientaciones (X, Y y XY).

Gracias a las variaciones realizadas sobre las medidas de los diseños originales, se ha conseguido controlar las desviaciones de la impresora 3D y se han podido fabricar las piezas con las medidas correctas del diseño original.

El proceso de fabricación FFF con impresora 3D comercial, tiene sus limitaciones, lo cual ha exigido al autor tener un conocimiento detallado del funcionamiento de la impresora 3D y realizar un control exigente de cada una de las piezas fabricadas, a fin de obtener un producto final de calidad y que sea capaz de cumplir con los requisitos marcados.

Para concluir el proyecto solo falta realizar el montaje del chasis-soporte y el conjunto de componentes electrónicos en el mismo; y probar la funcionalidad del cuadricoptero modular.

# FASES

## 1. Definición del proyecto.

- Memoria del proyecto.
- Organigrama de proyecto.
- Planificación estimada y real de tiempos de proyecto.

## 2. Definición del producto.

- Historia de los Drones.
- Los Cuadricopteros.
- Normativa Drones.
- Mecánica de vuelo.
- Hoja de especificaciones.
- Componentes electrónicos.
- Ideas de diseño.

## 3. Desarrollo del producto.

- Bocetos.
- Diseño.
- Cálculos.
- Fabricación 3D.

## 4. Conclusiones.

- Evolución.

## 5. Bibliografía.

## 6. Anexos (Documento aparte)

- Tablas.
- Imágenes
- Presupuesto.
- Planos

## DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1. MEMORIA.
2. ORGANIGRAMA DEL PROYECTO.
3. PLANIFICACIÓN ESTIMADA Y REAL DE TIEMPOS DE PROYECTO.

## **1.1 MEMORIA**

### **PRESENTACIÓN.**

En los últimos años la tecnología de Drones (máquinas controladas por control remoto), está tomando una gran importancia dentro del sector de las nuevas tecnologías; así como los Cuadricópteros, que están comenzando a despegar dentro del mismo sector, ya que permiten ampliar la capacidad del ser humano de realizar nuevos trabajos o servicios, así como disfrutar de un producto innovador.

El proyecto que se presenta a continuación, pretende acercar a todo tipo de usuarios una nueva tecnología, los Drones y dentro de estos, los Cuadricópteros, que son máquinas que se desplazan por el medio aéreo, mediante el uso de hélices que permiten a la máquina despegar del suelo, controlado todo con un aparato de radio control.

### **PROPÓSITO.**

Crear el chasis-soporte de un cuadricóptero modular, donde poder montar electrónica real y que pueda volar.

Este proyecto se ha enfocado en la definición y desarrollo del producto, se ha buscado información sobre los cuadricópteros, así como normativa que fija restricciones de cara al diseño. También se ha analizado teoría sobre mecánica de vuelo que ayude a entender el mecanismo de vuelo, y aporte información a la hora de crear el diseño modular. Se realizó la búsqueda, selección y compra de los componentes electrónicos adecuados, para permitir al cuadricóptero volar. Con la idea clara del camino a seguir se ha realizado el diseño, el cálculo y la fabricación con impresora 3D, del chasis-soporte del cuadricóptero modular, que permitirá montar los componentes electrónicos que han sido seleccionados.

### **ÁMBITO.**

Este proyecto se ha orientado al desarrollo de una máquina que sea capaz de volar, haciendo uso de los conocimientos adquiridos en el Grado de Ingeniería Mecánica, así como de las nuevas tecnologías. La impresión 3D y también módulos electrónicos ya desarrollados, para la creación de máquinas.

El proyecto forma parte de una iniciativa personal e inquietudes del autor, de cara a desarrollar y crear una máquina que permita ser modulada, que se pueda realizar su mantenimiento y reparación de forma sencilla y barata, con el fin de poder aprender a pilotar y realizar grabaciones.

### **ALCANCE.**

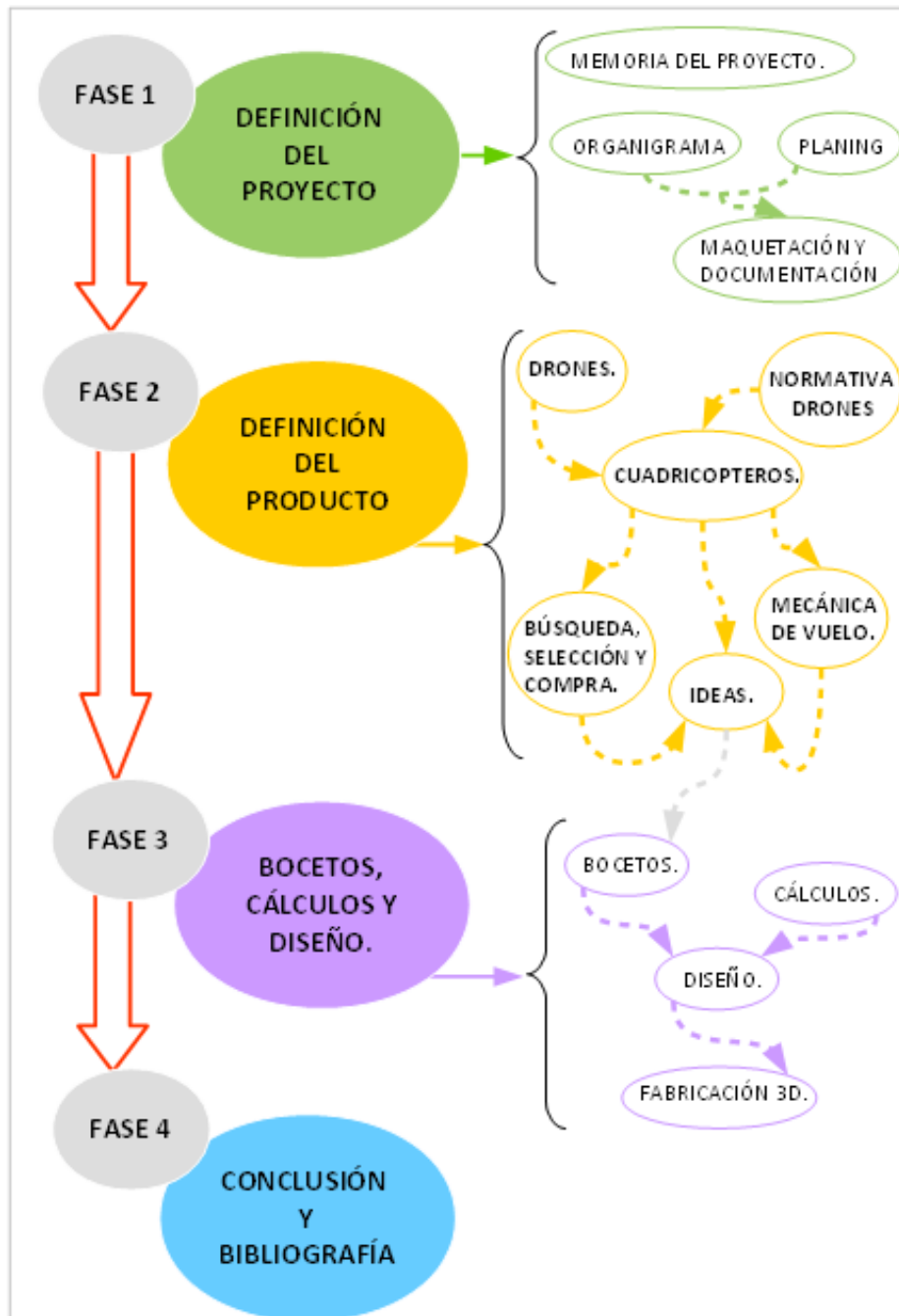
El proyecto intenta incorporar dos conceptos, el cálculo y diseño de piezas plásticas en función de módulos electrónicos de acción y control; y la creación de las mismas mediante impresión 3D.

Está destinado a todas aquellas personas que deseen: crear, montar y disfrutar de su propio cuadricóptero; así como a todos los usuarios de cuadricópteros que sean noveles, y quieran aprender a pilotar, sin miedo a que se pueda romper su máquina; ya que el diseño del mismo está pensado para realizar un montaje y mantenimiento sencillos.

### **OBJETIVO.**

Desarrollo, diseño, cálculo y fabricación con impresora 3D, de un cuadricóptero modular, que sea capaz de volar.

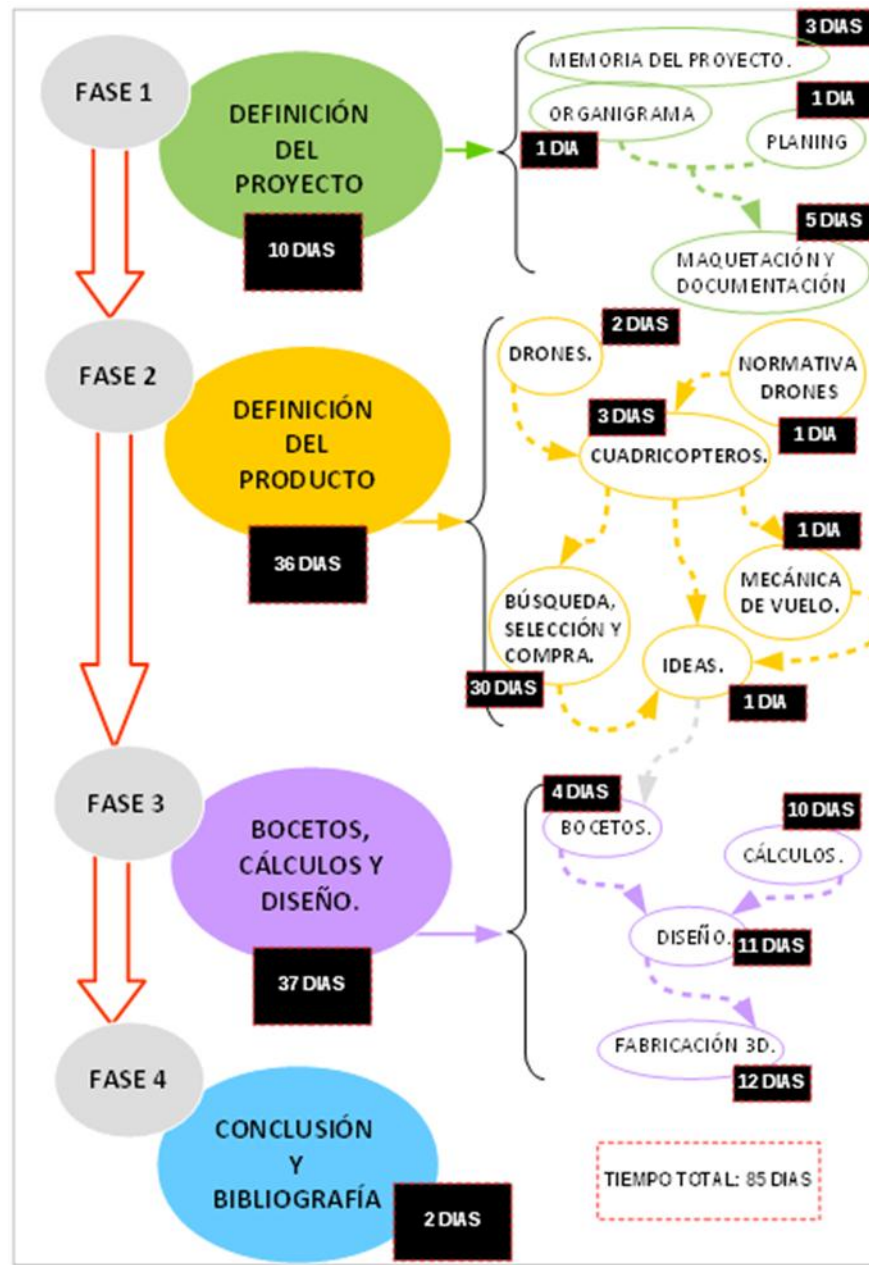
## 1.2 ORGANIGRAMA DEL PROYECTO.



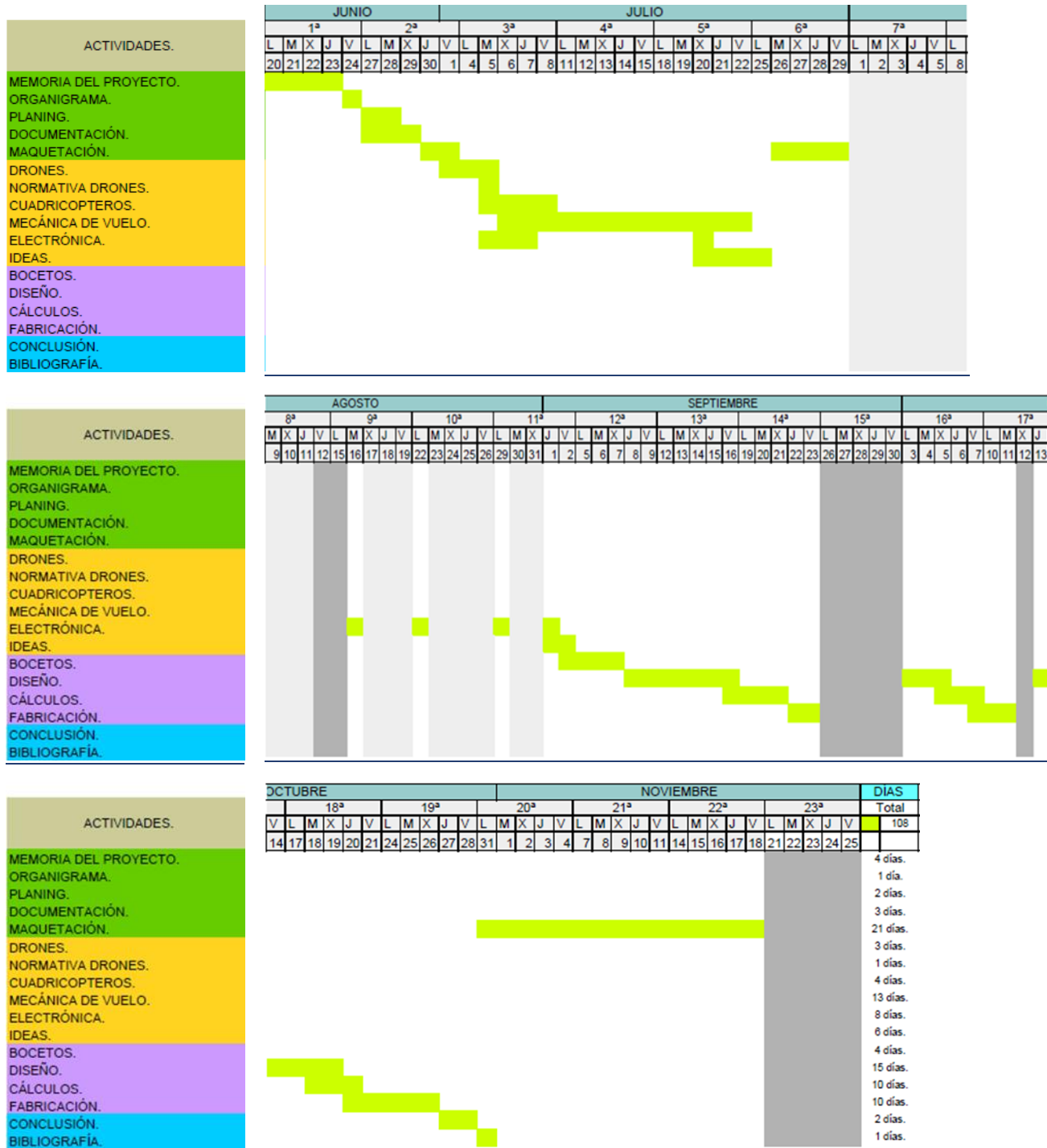


## 1.3 PLANIFICACIÓN ESTIMADA Y REAL DE TIEMPOS DE PROYECTO.

### PLANIFICACIÓN ESTIMADA.



PLANIFICACIÓN REAL.



## DEFINICIÓN DEL PRODUCTO

1. HISTORIA DE LOS DRONES.
2. LOS CUADRICÓPTEROS.
3. NORMATIVA DRONES.
4. MECÁNICA DE VUELO.
5. HOJA DE ESPECIFICACIONES.
6. COMPONENTES ELECTRÓNICOS.
7. IDEAS DE DISEÑO.

## 2.1 HISTORIA DE LOS DRONES.

La palabra Dron hace referencia a máquinas o vehículos no tripulados, que son capaces de desplazarse por el medio aéreo, de forma autónoma, gracias a un control remoto controlado por una persona u otra máquina.

Los Drones o maquinas no tripuladas, han estado ligados históricamente a usos militares, y su gran desarrollo se produjo en las guerras del siglo XX.



Imagen 2.1.1 (Guía de drones actual)

En la 1ª y la 2ª Guerra mundial se desarrollaron las primeras máquinas no tripuladas. La genealogía de las aeronaves no tripuladas esconde sus raíces en el desarrollo de los llamados «torpedos aéreos», antecesores de los actuales misiles crucero, que posteriormente se desarrollaron a través de la rama, de las bombas guiadas (no propulsadas), los blancos aéreos (llamados «drones» en la terminología anglosajona), los señuelos, los modelos recreacionales y/o deportivos de radio-control, las aeronaves de investigación, las aeronaves de reconocimiento, las de combate, e incluso algunos modelos más extraños de vuelo extra-atmosférico.

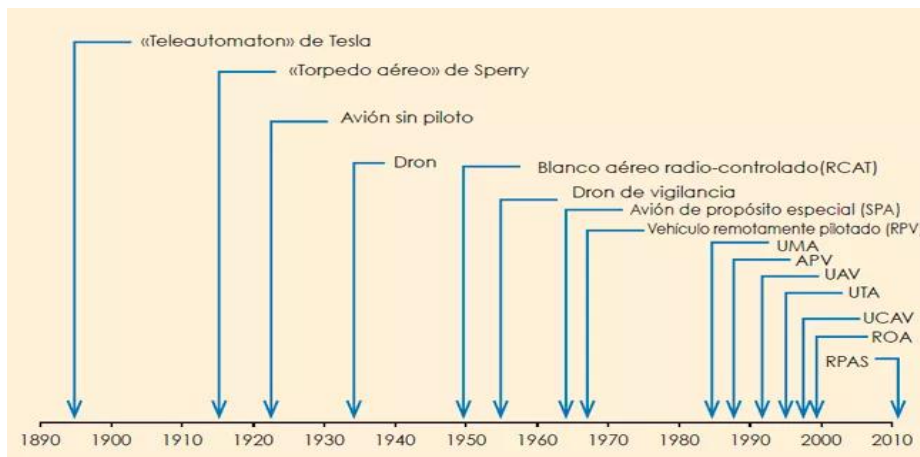


Imagen 2.1.2 (Cronología de los nombres aplicados a las aeronaves robóticas)

Hoy en día también se pueden encontrar drones que se desplazan por el medio terrestre e incluso el medio acuático. Estas máquinas, robots o drones, están diseñadas principalmente para el mercado militar, y poco a poco están entrando en el mercado civil. Algunos de los drones militares que se pueden encontrar actualmente.



Imagen 2.1.3

Dron español diseñado para desactivar bombas.

Drones franceses diseñados para vigilancia y control.



Imagen 2.1.4



Imagen 2.1.5

Dron Anfibio creado por el ejército Ruso.

Dron de exploración creado por EEUU.



Imagen 2.1.6 e Imagen 2.1.7

Los drones al igual que la tecnología han sufrido un crecimiento exponencial, que ha requerido la actualización a nivel internacional de las leyes y normativa de control en este nuevo mercado emergente.

*“En el año 2011 la organización de Aviación civil Internacional, organismo especializado de naciones unidas para la aviación civil y del cual España forma parte al haber suscrito el Convenio de Chicago de 1944, publicó su Circular 328 en la cual por vez primera reconoce a las aeronaves no tripuladas como aeronaves, con todo lo que ello trae consigo, y de entre todas las posibles tipologías escoge a las que se pilotan de manera remota para ser consideradas como aptas para la aviación civil, y no otros tipos (como podrían ser las autónomas). Así se han acuñado los términos que a continuación se detallan, y que tienen hoy en día una validez y aplicación internacional y casi única en todos los ámbitos.*

- *Aeronave pilotada remotamente (Remotely-Piloted Aircraft, RPA): una aeronave en la que el piloto al mando no está a bordo.*
- *Sistema de aeronave pilotada remotamente (Remotely-Piloted Aircraft System, RPAS): un conjunto de elementos configurables formado por un RPA, su estación de pilotaje remoto asociada (RPS – Remote Pilot Station), el sistema requerido de enlace de mando y control y cualquier otro elemento requerido en cualquier punto durante la operación del vuelo.”*

\*Texto extraído de la página web, <http://drones.uv.es/origen-y-desarrollo-de-los-drones/>



## 2.2 LOS CUADRICÓPTEROS.

Dentro del mercado de drones, la atención se ha centrado principalmente en el desarrollo de los cuadricópteros y a nivel más profesional, en el desarrollo de hexacópteros y octacópteros. Se ha analizado la actualidad del desarrollo de estas máquinas. En los últimos años se ha experimentado una pequeña revolución mundial: la del uso civil de los drones.

Las tareas que desarrollan actualmente los cuadricópteros, hexacópteros y octacópteros, son variadas:

Realizar trabajos de transporte.



Imagen 2.2.1



Imagen 2.2.2

Realizar trabajos vigilancia incluso de control, con cámaras térmicas.



Imagen 2.2.3

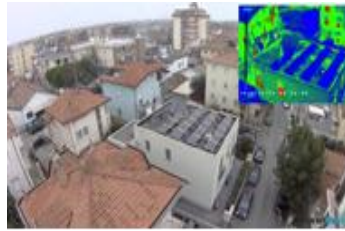


Imagen 2.2.4

Realizar trabajos grabación.



Imagen 2.2.5



Imagen 2.2.6

Por otro lado, uno de los usos más comunes y generalizados de estas máquinas es el lúdico; y en los dos últimos años ha aumentado mucho este tipo de uso, y a día de hoy ya se dispone de equipos visuales que permiten al usuario sentir que están volando junto a su máquina, gracias a las gafas de realidad aumentada. Esto ha propiciado la creación de circuitos de carreras, clubs para la mejora y el desarrollo de los cuadricópteros e incluso concursos donde se premia la innovación y desarrollo de estas máquinas.



Imagen 2.2.7

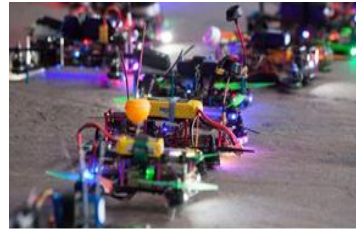


Imagen 2.2.8

Las expectativas de desarrollo para estas máquinas son variadas y quizás puedan verse el próximo año en el mercado octacópteros, para realizar transporte humano, o lo que es lo mismo vehículos aéreos.



Imagen 2.2.9

La accesibilidad a esta tecnología disparó el ingenio de multitud de personas y empresas, que empezaron a pensar en posibles usos civiles, que podían dar a estos aparatos.

El equipo de trabajo estadounidense, diseño y creó un dron portable del tamaño de un reloj. Permitía al usuario llevarlo en la muñeca y con un simple gesto, se alejaba, tomaba una instantánea y volvía a las manos del usuario.

Nixie, fue el ganador del concurso de Intel: “make it wearable” (Hazlo portable), del año 2014-2015.



Imagen 2.2.10

En el año 2016, un ingeniero español dio a conocer al mundo un nuevo Dron, su nombre Naviator. Lo peculiar de esta máquina, es que es capaz de desplazarse por el aire y también dentro del agua, como si de un submarino se tratara.



Imagen 2.2.11



Son claros ejemplos de las posibilidades y de la gran evolución, que estamos viviendo actualmente en el ámbito civil, de este tipo de máquinas.

Dentro de los Cuadricopteros de fabricación propia podemos encontrar varios, en el mercado español. El que más llama la atención por su simplicidad y eficacia es el Mosquito, de la empresa Bonadrone.



Imagen 2.2.12



Imagen 2.2.13

También podemos encontrar el Microquad scrab y el Microhexa scrab. Ambos drones han sido diseñados por un particular, y permite al usuario montar electrónica real.

#### Microquad



Imagen 2.2.14



Imagen 2.2.15

#### Microhexa

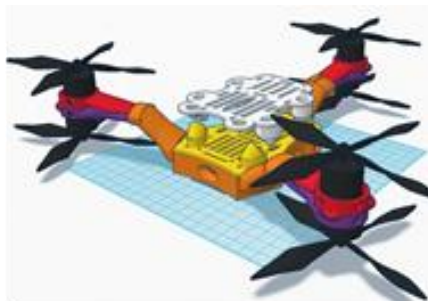


Imagen 2.2.16



Imagen 2.2.17

Ambos drones siguen la filosofía del “Haz lo tú mismo” y nos muestran algunas posibilidades de diseño.

## 2.3 NORMATIVA DE DRONES.

Actualmente el uso de estas máquinas, dentro del territorio español, queda regulado dentro del Boletín oficial del estado, en el número 252, sección I (Pág. 83976-83982), del viernes 17 de octubre de 2014, (VER ANEXO...) de donde se han extraído las siguientes regulaciones.



### Nuevo marco regulatorio temporal para las operaciones con drones.

- La normativa define los requisitos según el peso de la aeronave tripulada por control remoto y establece las obligaciones que deben cumplir los pilotos y las empresas que las utilicen.
- Los drones de más de 25 Kg deberán inscribirse en Registro de Matrícula de Aeronaves y disponer de un certificado de aeronavegabilidad, los de peso inferior no.
- Los operadores de drones de menos de 25 kg tendrán que presentar en AESA una declaración de responsabilidad conforme su aeronave cumple todas esas exigencias.

*Madrid, 8 de julio de 2014 (Ministerio de Fomento)*

El nuevo marco regulatorio temporal para las operaciones con aeronaves pilotadas por control remoto de peso inferior a los 150 kg al despegue, ya está en vigor hoy, tras ser aprobado el viernes en Consejo de Ministros y publicado el sábado en el Boletín Oficial del Estado (BOE).

Esta nueva regulación responde a la necesidad de establecer un marco jurídico que permita el desarrollo en condiciones de seguridad de un sector tecnológicamente puntero y emergente, y será desarrollada reglamentariamente en los próximos meses.

Este reglamento temporal contempla los distintos escenarios en los que se podrán realizar los distintos trabajos aéreos y en función del peso de la aeronave. Además, las condiciones ahora aprobadas se completan con el régimen general de la Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea, y establecen las condiciones de operación con este tipo de aeronaves, además de otras obligaciones.

Este régimen permite, a partir de ahora, utilizar drones para realizar trabajos aéreos como son: actividades de investigación y desarrollo; tratamientos aéreos, fitosanitarios y otros que supongan esparcir sustancias en el suelo o la atmósfera, incluyendo actividades de lanzamiento de productos para extinción de incendios; levantamientos aéreos; observación y vigilancia aérea incluyendo filmación y actividades de vigilancia de incendios forestales; publicidad aérea, emisiones de radio y TV, operaciones de emergencia, búsqueda y salvamento; y otro tipo de trabajos especiales.

Aunque en un primer momento, y hasta que no esté aprobada la reglamentación definitiva, las operaciones que se pueden realizar se limitarán al espacio aéreo no controlado y sobre zonas no pobladas.

El régimen aprobado establece requisitos en función del peso máximo del aparato al despegue y los clasifica en aeronaves de más de 25 kg, de menos de 2 kg y de hasta 25 kg. Pero, independientemente de su peso hay unos requisitos comunes para todas ellas, así como para los pilotos y las empresas que las operen.

## REQUISITOS COMUNES PARA TODOS

Todos los drones, sin excepción, deben llevar fijada en su estructura una placa de identificación en la que deberá constar, de forma legible y a simple vista, la identificación de la aeronave, el nombre de la empresa operadora y los datos para contactar con la misma.

Indistintamente del tamaño de la aeronave tripulada por control remoto, todas las empresas operadoras de drones deberán cumplir los requisitos establecidos en la normativa que ahora se aprueba, entre ellos, disponer de un manual de operaciones y de un estudio aeronáutico de seguridad para cada operación (por ejemplo, con el viento máximo que va a volar).

Además, deben demostrar que ha adoptado las medidas adecuadas para que la aeronave no sufra interferencias deliberadas al enlace de radio, y que la operación se va a realizar a una distancia mínima de 8 kilómetros de cualquier aeropuerto o aeródromo.

Todos los pilotos de drones, deberán acreditar, entre otros requisitos, que son titulares de cualquier licencia de piloto, incluyendo la de piloto de ultraligero, o demostrar de forma fehaciente que disponen de los conocimientos teóricos necesarios para obtenerla.

## LAS AERONAVES DE 25 KG O MENOS

Una de las principales novedades de este reglamento es que, al contrario de lo que ocurría hasta ahora, los drones de menos de 25 kg al despegue no deberán estar inscritos en el Registro de Matrícula de Aeronaves y disponer de un certificado de aeronavegabilidad, sí lo tienen que tener los que superen este peso.

Otra de las novedades es que los operadores de aeronaves de 25 kg o menos, no necesitan solicitar una autorización para cada uno de los requisitos que exige la normativa (manual de operaciones, estudio aeronáutico de seguridad para cada operación), únicamente tienen que presentar en la Agencia Estatal de seguridad Aérea (AESA) una declaración de responsabilidad conforme su aeronave cumple todas esas exigencias.

Los operadores de aparatos con este peso, tendrán que notificar a AESA de cada operación con una antelación mínima de 5 días antes del inicio de la misma, así como de cualquier modificación que se produzca.

Además, tendrán que volar dentro del alcance visual del piloto y a una distancia de éste no mayor de 500 metros y sin superar los 120 metros de altura.

En el caso de los drones con un peso inferior a 2 kg en el despegue, que vayan a realizar operaciones más allá del alcance visual del piloto, antes de realizar los vuelos deberán emitir un NOTAM, es decir, informar al resto de los usuarios del espacio aéreo dónde y cuándo va a volar.

Por otro lado, las aeronaves pilotadas por control remoto para vuelos de prueba, demostración o investigación podrán realizar vuelos en espacio aéreo no controlado dentro del alcance visual del piloto o en una zona del espacio aéreo segregado al efecto, previa autorización de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA).

El cumplimiento de todos estos requisitos, no exime al operador, que es, en todo caso, el responsable de la aeronave y de la operación, del cumplimiento del resto de la normativa aplicable, en particular en relación con el uso del espectro radioeléctrico, la protección de datos o la toma de imágenes aéreas, ni de su responsabilidad por los daños causados por la operación o la aeronave.

Algunas recomendaciones del Ministerio de Fomento y la Agencia estatal de seguridad aérea, para el uso de drones de menos de 2 kilogramos de peso, dentro del territorio español.

Hobby / Vuelos recreativos

## ¿Qué puedo hacer con mi DRON?

El uso de un dron como hobby o como vuelo recreativo no necesita habilitación de AESA, pero debe cumplir unas normas de seguridad. Para cualquier otro uso de un dron sí hay que acudir a AESA.

### ¿Qué debo saber antes de utilizar un DRON?

- ✓ Siempre tengo que tenerlo a la vista y no superar los 120 metros de altura.
- ✓ No es necesario ser piloto pero se debe saber volar con seguridad.
- ✓ Sólo se pueden volar los drones en zonas adecuadas para ello. Por ejemplo, zonas de vuelo de aeromodelismo, zonas despobladas, etc.
- ✓ Los daños que cause el dron son responsabilidad de quién lo maneja.

### ¿Qué NO puedo hacer con un DRON?

- ⊘ No puedo volarlo en zonas urbanas.
- ⊘ No puedo volarlo sobre aglomeraciones de personas: parques, playas, conciertos, bodas, manifestaciones, procesiones, etc.
- ⊘ No puedo volarlo de noche.
- ⊘ No puedo volarlo cerca de aeropuertos, aeródromos, etc.
- ⊘ No puedo volarlo donde se realicen vuelos con otras aeronaves a baja altura (zonas de parapente, paracaidismo, aeródromos, helipuertos, etc.).
- ⊘ No puedo poner en peligro a terceros.

**EL DRON NO ES UN JUGUETE, ES UNA AERONAVE**

El uso imprudente de un dron puede tener consecuencias.

Las multas por su uso indebido pueden alcanzar los 225.000 euros.

**¡DIVERTIRSE SIGNIFICA VOLAR DE FORMA SEGURA!**

Evite poner en peligro a otros aviones y a las personas y bienes en tierra.

Para más información: [www.seguridadaerea.gob.es](http://www.seguridadaerea.gob.es)



## 2.4 MECÁNICA DE VUELO.

- **Definición de mecánica de vuelo:**

*“Ciencia aplicada que se ocupa del movimiento de las máquinas/vehículos voladoras”*

*“Ciencia aplicada que se ocupa del vuelo atmosférico de los aviones”*

- **Vuelo:**

*“Desplazamiento de un vehículo a través de un medio fluido o el vacío”*

- **Máquina/vehículo:**

*“Cualquier objeto artificial formado por un conjunto de sistemas deformables, ligados entre si de alguna forma”*

...

Enunciar esta rama de la física, dentro del presente proyecto, tiene como finalidad aclarar el funcionamiento de este tipo de máquinas y realizar una explicación cualitativa, de como se ve afectada la máquina, cuando se varía la longitud de los rotores al centro de gravedad.

Para realizar esta parte del proyecto se ha hecho uso de una Tesis doctoral (1), que ha permitido comprender aspectos físicos, que no están dentro de las competencias del Grado de Ingeniería Mecánica.

...

### 1. Descripción del funcionamiento de los cuadricópteros, utilizando esquemas que permitan visualizar como son capaces de desplazarse.

Para explicar el funcionamiento de los cuadricópteros se utiliza a los helicópteros como ejemplo, hasta cierto límite. Dado que ambos funcionan con hélices y no tienen alerones para virar o cambiar altitud, lo básico de un helicóptero es aplicable a los cuadricópteros. Sin embargo, al momento de explicar los cambios de dirección, sí se tiene que hablar específicamente de los cuadricópteros.

Un helicóptero genera sustentación a partir del giro de su hélice principal. Dado que las aspas tienen cierta geometría, por el principio de Bernoulli, estas disminuyen la presión en su parte superior. Al tener una presión mayor en la parte inferior de las aspas, tal que genere una fuerza mayor que el peso y la fuerza generada por la presión en la parte superior de las aspas, el helicóptero comenzará a elevarse. Entre más rápido gire la hélice, mayor fuerza de sustentación. La Figura 2.4.1 muestra un diagrama sencillo.



Figura 2.4.1: Diagrama de fuerzas básico de un helicóptero.

(1)Modelado matemático y control inteligente de un cuadricóptero. Eduardo Miguel Bucio Gallardo. México, D.F., mayo de 2015



En el caso de un cuadricóptero, son 4 hélices las que deben superar al peso y a la fuerza ejercida por la presión superior. Justamente por ello es que los cuadricópteros requieren rotores mucho más pequeños, así como hélices de menores dimensiones.

Como siguiente punto, avanzar hacia delante o frenar en un helicóptero es ocasionado por el cambio de inclinación de las aspas de su hélice, logrando así que el helicóptero se incline y se consiga una fuerza de sustentación inclinada, se puede ver en la figura 2.4.2. Dicha fuerza tiene dos componentes, una vertical que mantiene al helicóptero en vuelo y otra horizontal, la cual impulsa al helicóptero hacia adelante o hacia atrás, en el caso del frenado.

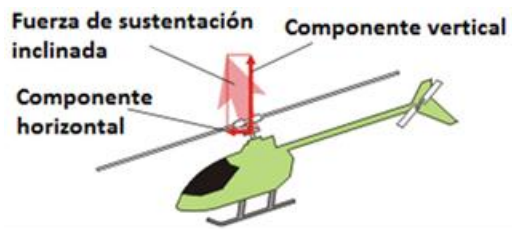


Figura 2.4.2: Fuerza de sustentación inclinada de un helicóptero.

Los movimientos de traslación y frenado se pueden observar claramente en la Figura 2.4.3.



Figura 2.4.3: Vuelo de traslación y frenado de un helicóptero.

Los movimientos de traslación y frenado mencionados funcionan de manera similar en un cuadricóptero. Este también se tiene que inclinar hacia adelante o hacia atrás, para desplazarse o frenar. Sin embargo, en un cuadricóptero no se cambia el ángulo de las aspas para inclinar al rotor. Más bien, se aumenta la velocidad de dos rotores y se disminuye proporcionalmente en los dos restantes.

Suponiendo el centro de masa del cuadricóptero en el centro geométrico del mismo e imaginando ese punto como un pivote, si cada una de las 4 hélices genera una fuerza de sustentación idéntica, el cuadricóptero no tendrá ninguna inclinación ni balanceo. Sin embargo, si las dos hélices de atrás generan mayor sustentación que las de adelante, el cuadricóptero comenzará a inclinarse hacia esta dirección. Si las fuerzas siguieran descompensadas, el cuadricóptero seguiría girando hasta estar de cabeza y perder el control. Si cuando el cuadricóptero logra la inclinación adecuada, se vuelven a balancear las fuerzas, el cuadricóptero se mantendría en cierta inclinación y volaría hacia adelante. Al momento de frenar, sucede lo contrario, las hélices de adelante aumentan su fuerza y las de atrás la disminuyen.

El mismo principio observado en el movimiento hacia adelante y hacia atrás, se aplica al volar hacia los lados. Esto ofrece otra ventaja a un cuadricóptero sobre un helicóptero. El cuadricóptero puede volar hacia cualquier lado sin problemas. Dado que puede ser totalmente simétrico con respecto a su centro, no importa hacia qué lado vuele, siempre podrá hacerlo sin complicaciones. Un helicóptero, por el otro lado, no puede hacer esto de manera eficiente.

Con respecto al equilibrio de momentos en un cuadricóptero, dos de sus hélices giran en sentido horario y dos en sentido antihorario. La Figura 2.4.5 muestra un diagrama que representa el sentido de giro de las hélices.

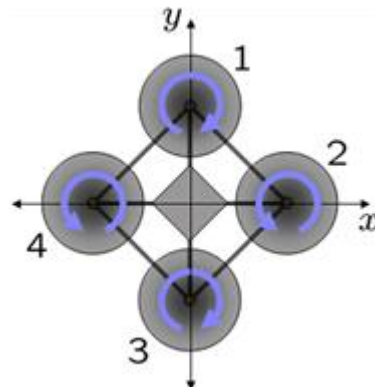


Figura 2.4.5: Sentido de giro de las hélices de un cuadricóptero.

Tal como Newton mencionó, a toda acción, corresponde una reacción. Si un motor gira hacia un lado, generará un par hacia el otro. En el caso de los cuadricópteros, observando la Figura 1.14, si el motor 1 y el motor 3 giran en un sentido, generando un torque  $T$ , y los motores 2 y 4 giran en sentido opuesto con un torque  $-T$ , el cuadricóptero no girará sobre su propio eje y se mantendrá estable.

Conociendo el efecto de los torques, se puede explicar cómo cambiar la orientación de un cuadricóptero. Para lograr esto, se disminuye el torque de dos motores que giran en el mismo sentido, en la misma proporción que se aumenta el torque de los otros dos motores. Esto generará que el cuadricóptero gire sobre su propio eje, hasta que los torques se vuelvan a equilibrar y la fricción del aire frene su movimiento giratorio.

En aeronáutica, los giros que puede describir un aparato según sus ejes se llaman Guiñada, Alabeo y Cabeceo. En la siguiente figura 2.4.6, se puede ver a qué ejes se refiere cada término.

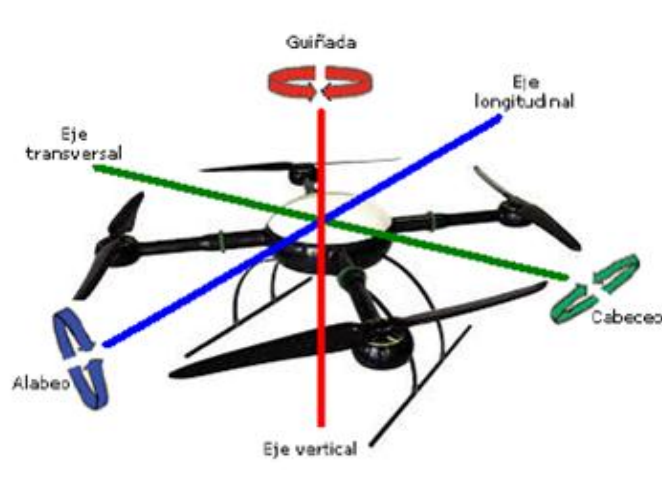


Figura 2.4.6: Ejes de giro de un cuadricóptero.

Para entender como realiza el cuadricoptero estos giros, que le permiten orientarse en el aire, veremos a continuación una explicación gráfica, que facilitara el entendimiento y la comprensión del funcionamiento de los motores del cuadricoptero.

Se pueden observar gráficamente los diferentes movimientos que puede realizar el cuadricóptero, en función del empuje que ejerce cada motor.

### Control de la posición en altura.

Con los 4 motores aplicando el mismo empuje podemos llegar a 3 movimientos:

- Estabilizarse en el aire
- Subir altura
- Bajar altura

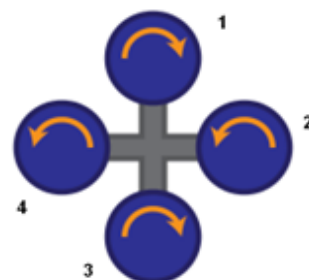


Figura 2.4.7

### Control de la guiñada.

Para ajustar la guiñada se sube el empuje de dos motores opuestos mientras los otros dos se mantienen estables. Consiguiendo que la máquina gire en torno al eje vertical.

- Aumentando el empuje en 1 y 3, gira en sentido antihorario.
- Aumentando el empuje en 2 y 4, gira en sentido horario.

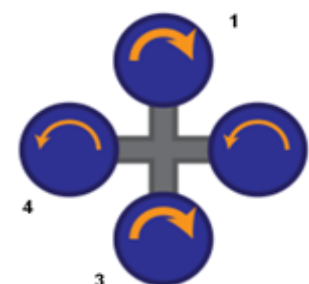


Figura 2.4.8

### Control del alabeo.

Para controlar el alabeo se modifica el empuje de los motores opuestos con la misma diferencia, pero en uno se sube y en otro se baja, consiguiendo desplazamientos laterales, a izquierda o derecha.

- Aumentando el empuje en 1 y bajando el empuje en 3, se genera una inclinación al lado del motor 3.
- Aumentando el empuje en 3 y bajando el empuje en 1, se genera una inclinación al lado del motor 1.

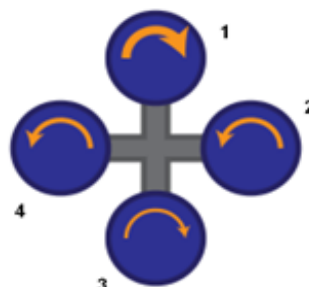


Figura 2.4.9

### Control del cabeceo.

Para controlar el cabeceo realizamos la misma acción que para el alabeo, pero modificando el empuje de la otra pareja de motores, consiguiendo desplazamientos hacia delante y hacia detrás.

- Aumentando el empuje en 4 y bajando el empuje en 2, se genera una inclinación al lado del motor 2.
- Aumentando el empuje en 2 y bajando el empuje en 4, se genera una inclinación al lado del motor 4.

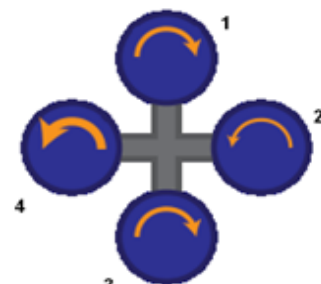


Figura 2.4.10



## 2. Explicación cualitativa, de como se ve afectada la máquina, cuando se varía la longitud de los rotores al centro de gravedad.

La centralita o controladora, es la encargada de controlar el vuelo de la máquina; mediante la computación de las ecuaciones de desplazamiento para los seis grados de libertad, y en función de las características de motores, hélices, pesos, inercias y distancia del centro de gravedad del cuadricóptero al centro de gravedad de los motores (debe ser igual para todos los motores).

El cerebro del aparato regula los torques ejercidos por los motores, para poder pilotar la máquina y ayudar a la estabilización de la misma. También permite aumentar la sensibilidad del control, para ayudar al usuario a pilotar la máquina, adaptándose al medio de la mejor manera posible.

La última característica mencionada, la distancia del centro de gravedad del cuadricóptero al centro de gravedad de los motores, queda fijada en la centralita con un valor fijo, debido a que es una parte mecánica de la máquina que debe estar fija durante el funcionamiento de la misma, pero las centralitas están preparadas para adaptarse a otras longitudes de brazo. Con una longitud de brazo menor a la fijada por defecto en la centralita, se aumenta la agilidad reduciendo la estabilidad. Y por otro lado, con una longitud de brazo mayor a la fijada por defecto, se reduce la agilidad aumentando la estabilidad.

Observando el diagrama que muestra los sentidos de giro de los motores, sus torques ( $T$ ) correspondientes, las fuerzas de sustentación y los ejes coordenados del cuerpo libre, nos hacemos una idea de cómo afectan al centro de gravedad del cuadricóptero variaciones en los rotores, que son los que crean la fuerza de sustentación, generando momentos que dependen de la longitud de brazo que se haya elegido para la construcción del chasis.

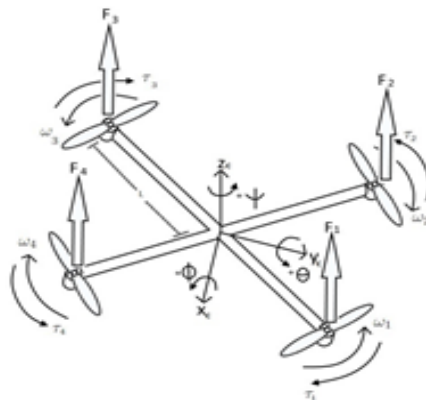


Imagen 2.4.11

Diagrama de velocidades angulares, torques ( $T$ ) y fuerzas de sustentación del cuadricóptero.

Cuanto mayor es la separación entre el centro de gravedad del cuadricóptero y el de los motores, mayor es la estabilidad de vuelo, consiguiendo un balance en vuelo mucho más estable; pero a la vez es más torpe a la hora de realizar movimientos de giro o desplazamiento bruscos.

Por contra cuanto menor es la separación entre los centros de gravedad del cuadricoptero, menor es la estabilidad de vuelo, lo que genera un balance en vuelo mucho más inestable, pero a la vez es más ágil a la hora de realizar movimientos de giro o desplazamientos bruscos.

El método de computación que se usa para programar la aviónica de la controladora, nos define por defecto una longitud determinada, entre el centro de gravedad del cuadricóptero y el centro de gravedad de los motores. La información obtenida aclara que se puede variar de forma mecánica la longitud, aumentándola o disminuyéndola, dentro de unos márgenes, manteniendo la simetría entre los motores. Estas variaciones tienen como objetivo mejorar la estabilidad o la agilidad de la máquina, en función de las necesidades.

## **2.5 HOJA DE REQUISITOS DE DISEÑO.**

Descripción de las diferentes características o atributos que debe presentar el Cuadricoptero.

- Un requisito del cuadricoptero, es que sea capaz de volar, en interiores preparados y en exteriores, dentro de una climatología adecuada.
- Otro requisito del cuadricoptero es el peso. Este no debe pesar más de 2 kilogramos, para que así no se vea afectado por la normativa vigente, que exige el cumplimiento de una serie de requisitos para su uso.
- El tamaño del cuadricoptero no deberá tener una distancia entre motores, mayor de 60 centímetros, lo cual supondría un aumento considerable del peso.
- La altura desde las hélices hasta las patas, que apoyan en el suelo, deberá ser mayor de 10 centímetros, lo que permitirá un despegue y un aterrizaje óptimos.
- El material usado para la fabricación podrá ser PLA o ABS, que son los materiales que pueden ser utilizados por una impresora 3D comercial, de forma óptima, permitiendo obtener un producto de calidad.
- El chasis-soporte del cuadricoptero deberá ser resistente y lo más ligero posible, presentando alojamientos para colocar: motores, variadores, placa de distribución, controladora, batería y soporte para una cámara.
- El chasis-soporte del cuadricoptero permitirá un montaje y desmontaje sencillo del mismo y de las partes que lo componen, facilitando el mantenimiento e intercambio de piezas que puedan romperse o deteriorarse.
- El cuadricoptero deberá ser capaz de levantar 150 gramos, que es el peso de una cámara de grabación deportiva.
- La duración del vuelo, debería ser de 10 minutos.
- El aspecto visual del cuadricoptero deberá permitir al usuario una identificación visual de la parte delantera y trasera del mismo, facilitando el control.

**Teniendo en cuenta todos los requisitos que debe presentar el cuadricoptero, se procederá a la selección de los diferentes componentes electrónicos que ha de montar y posteriormente al diseño del mismo.**

## 2.6 COMPONENTES ELECTRÓNICOS.

Teniendo en cuenta la hoja de requisitos descrita en el punto anterior, se realizara un búsqueda de componentes electrónicos que sean capaces de satisfacer las especificaciones que se han definido, para la creación del cuadricoptero. Después de realizar una búsqueda en profundidad de los diferentes componentes electrónicos que son necesarios para conformar la parte de sensado, control y accionamiento del cuadricoptero, se ha encontrado gran variedad de productos, para las diferentes partes que componen la electrónica.

Para poder seleccionar los componentes que mejor se adaptan a las necesidades del proyecto, se han realizado tablas comparativas de los diferentes componentes, con el objetivo de realizar la mejor elección posible. En las tablas comparativas se ha decidido presentar tres opciones diferentes para cada componente.

Las principales necesidades para hacer volar un Cuadricoptero son las siguientes:

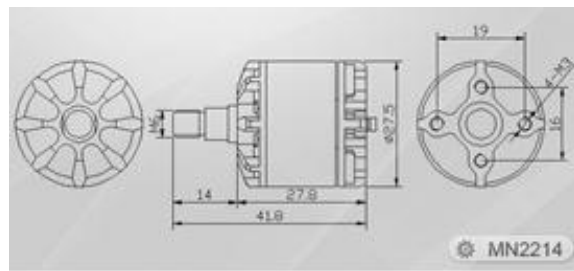
- Determinar las características de empuje, que son necesarias para elegir el motor.
- Determinar la potencia y energía demandada, que son necesarias para elegir la batería.
- Seleccionar una controladora adecuada, que sea capaz de gestionar todos los componentes.

### SELECCIÓN DE MOTORES.

La selección se ha centrado en los motores “brushless” (sin escobillas), que no tienen conexión física entre las partes eléctricas en movimiento, son mucho más eficientes y elimina en gran parte el mantenimiento. Y entre los motores sin escobillas elegiremos los “outrunner”, que son motores que están preparados para trabajar a bajas revoluciones con un torque elevado. Su principal virtud es, que tiene mucha potencia en muy poco peso.

A continuación se pueden ver los tres motores, que se han seleccionado y que se podrían montar en el dron. Son algunos de los motores más usados dentro de la construcción de cuadricópteros. Además son motores versátiles usados para drones de carreras-acrobáticos y también son usados para drones que portan cámaras de grabación.

#### MN 2214

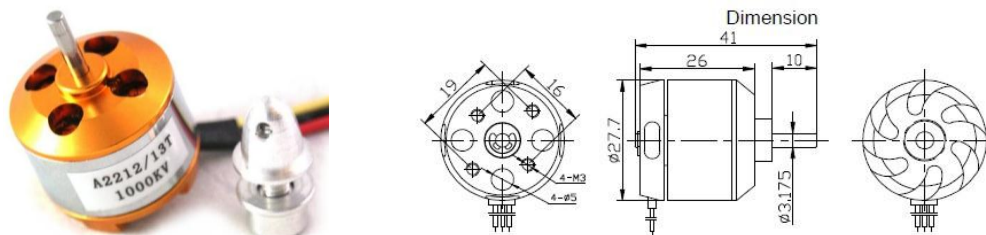


Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating temperature( °C)
11.1	T-MOTOR Antigravity 9*3CF	50%	1.9	21.09	199	5200	9.44	43
		65%	3	33.30	289	6200	8.68	
		75%	4.3	47.73	381	6900	7.98	
		85%	5.8	64.38	478	7800	7.42	
		100%	8.1	89.91	605	8700	6.73	

Imágenes 2.6.1, 2.6.2 y 2.6.3

Motor brushless MN 2214 de 39g, incluye bancada y adaptador de hélice, destinado para baterías de 7.4V y 11.1V, ha sido diseñado para un dron comercializado, pero puede ser montado en otro diferente.

**GWS 2212/13T**



Voltage	No Loading		KV	Dimensions		Weight	
	Current	RPM		Shaft	Appearance	g	oz
11.1 V	0.4 A	11400	1030	3mm	22mm	49	1.73

**Operation Reference: \***

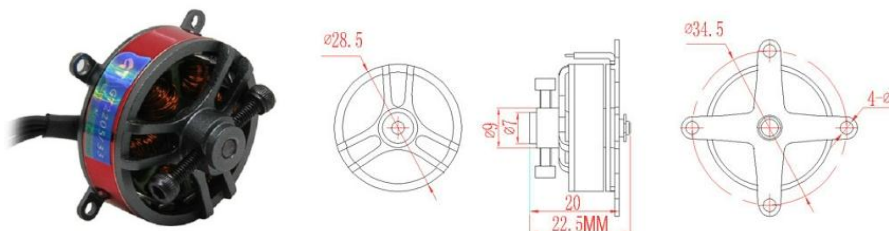
Data taken using: GWESC35A. Test Data listed above taken after one minute of high-RPM motor operation.

Prop	Volts (V)	Amps (A)	Thrust		Power (W)	Efficiency		Tem. °C	RPM
			(g)	(oz)		(g/w)	(oz/kw)		
EP-9047	7.40	7.70	357.00	12.59	56.98	6.27	220.98	47.00	7080
	11.10	12.30	597.00	21.06	136.53	4.37	154.22	56.00	8760
	14.40	16.30	817.00	28.82	234.72	3.48	122.77	69.00	9990
EP-9050	7.40	6.60	337.00	11.89	48.84	6.90	243.37	52.00	7350
	11.10	11.50	604.00	21.30	127.65	4.73	166.89	56.00	9060
	14.40	15.20	790.00	27.86	218.88	3.61	127.30	73.00	10020
EP-9070	7.40	9.70	319.00	11.25	71.78	4.44	156.74	54.00	6090
	11.10	15.60	465.00	16.40	173.16	2.69	94.71	78.00	6810
	14.40	19.70	509.00	17.95	283.68	1.79	63.28	106.00	7598
EP-1047	7.40	8.10	418.00	14.74	59.94	6.97	245.96	39.00	4890
	11.10	13.00	672.00	23.70	144.30	4.66	164.25	48.00	6450
	7.40	6.90	384.00	13.54	51.06	7.52	265.25	48.00	5310
EP-1060	11.10	12.00	641.00	22.61	133.20	4.81	169.73	54.00	7080
	7.40	9.60	386.00	13.61	71.04	5.43	191.64	52.00	4320
	11.10	15.40	613.00	21.62	170.94	3.59	126.48	59.00	5430

Imágenes 2.6.4, 2.6.5 y 2.6.6

Motor brushless de la serie 2212 de 1000Kv de 49g, incluye bancada y adaptador de hélice de rosca con una potencia de 150-165W, destinado para baterías de 7.4V y 11.1V.

**GT 2205/33**



No. Of cells	2-3xLi-Poly
Stator dimensions	22x5mm
Shaft diameter	3mm
Weight	23g/0.81oz
Recommended model weight	100-500g
Recommended prop without gearbox	GWS 8x4 8x4.3

Model	Cell Count	RPM/V	Prop (GWS)	RPM	MAX current (<60S)	Thrust
GT2205/33	2S	1260	8x4	7050	3.5A	215g 0.47lb
	3S	1260	8x4.3	16500	6.8A	430g 0.95lb

Imágenes 2.6.7, 2.6.8 y 2.6.9

Motor eléctrico brushless 2205 de la firma EMAX serie Grand Turbo destinado para aviones de 100g a 500g para baterías de 7.4V y 11.1V y también destinado para drones.

**TABLA DE DECISIÓN**

	Peso (gr)		Empuje (gr)		Montaje		Precio (€)		
MN2214	39	3	600	4	Medio	3	38	1	11
GWS 2212/13T	49	2	600	4	Fácil	4	15	4	14
GT 2205/33	23	4	430	2	Fácil	4	20	3	13

La calificación se ha hecho del 1-4, para dar una puntuación a las características más importantes.

\* El motor elegido es el GWS 2212/13T, que pese a sus 49 gramos de peso, nos ofrece un empuje superior al medio kilogramo, en concreto 600 gramos. El montaje del mismo es muy sencillo, ya que dispone de un soporte que ayuda a realizar los anclajes. El precio también es un dato importante a tener en cuenta.



Imágenes 2.6.10

\* Las hélices seleccionadas para propulsar el cuadricóptero son las GF 1045, que son equivalentes a las EP 1047 de la tabla de referencias del motor. Estas hélices nos proporcionan un empuje vertical máximo de 672 gr. (11,1v) y nos asegura un empuje vertical mínimo de 418 gr. (7,4v). El peso de la hélice es de tan solo 3 gr.

\* Para saber aproximadamente cuanto necesita levantar cada motor podríamos se ha realizado el siguiente cálculo:

$(\text{Peso del cuadricóptero completo} \times 2) / 4$  (número de motores) = Peso que tiene que levantar cada motor

$(800\text{gr} \times 2) / 4 = 400\text{g}$

Cada motor deberá tener fuerza para levantar mínimo 400gr. Estos valores están dentro de la capacidad de empuje que es capaz de desarrollar cada motor.

### SELECCIÓN DE VARIADORES (Electronic Speed Controller).

Los motores son controlados mediante un placa electrónica, llamada variador o ESC (Electronic Speed Controller), que están conectadas al motor y regulan su velocidad mediante un circuito. La velocidad de giro se varía mediante una señal suministrada por el PWM (modulación por ancho de pulsos de una señal o fuente de energía). Vamos a centrarnos en los variadores adecuados para soportar el amperaje de los motores.

Los ESC seleccionados soportan un amperaje mayor de 15 A, intensidad máxima que consume cada motor.

#### ESC EMAX 25A



Imágenes 2.6.11

##### **Especificaciones:**

Peso: 28g  
Dimensiones: 55 x 28 x 7 mm  
Baterías aceptadas: 5.6V - 16.8V (2-3 celdas Li-Poly)  
BEC: 2A/5V  
Corriente aceptada: 25A nominal (Max 30A durante menos de 10 segundos)  
Programmable: -

#### ESC Simonk 30A



Imágenes 2.6.12

##### **Especificaciones:**

Peso: 25g  
Dimensiones: 45 x 24 x 11mm  
Baterías aceptadas: 5.6V - 16.8V (2-4 celdas Li-Poly, O 5-12 celdas de Ni-MH Ni-MH)  
BEC: 2A  
Corriente aceptada: 30A nominal (Max 40A durante menos de 10 segundos)  
Programmable: Si  
Firmware tipo hobbywing. Es actualizable a SimonK

#### ESC RaceStar 30A



Imágenes 2.6.13

##### **Especificaciones:**

Peso: 9.1g  
Dimensiones: 28 x 13 x 5mm  
Baterías aceptadas: 5.6V - 16.8V (2-4 celdas Li-Poly, O 5-12 celdas de Ni-MH Ni-MH)  
BEC: NO  
Corriente aceptada: 30A nominal (Max 35A durante menos de 10 segundos)  
Firmware no es actualizable

### TABLA DE DECISIÓN

	Peso (gr)		Corriente/C.Max (A)		Programable&BEC		Montaje		Precio (€)		
EMAX 25A	28	1	25/30	2	-/Si	3	Fácil	4	15	2	12
Simonk 30A	25	1	30/40	4	Si/Si	4	Fácil	4	8	4	17
RaceStar 30A	9,1	4	30/35	3	-/No	2	Fácil	4	18	1	14

La calificación se ha hecho del 1-4, para dar una puntuación a las características más importantes.

\* El ESC elegido es el Simonk 30A, que pese a sus 25 gramos de peso, nos ofrece el amperaje necesario para abastecer de corriente al motor, incluso nos ofrece un margen alto, ante posibles picos. El montaje del mismo es muy sencillo, solo necesita una superficie de apoyo. El precio también es un dato importante a tener en cuenta.



### SELECCIÓN DE BATERÍA.

Se ha decidido elegir baterías Li-Poly porque tienen la capacidad de abastecer de mucha energía en breves periodos de tiempo a los puntos de consumo. Con 2 celdas o más y un voltaje de 11,1 V debido a las exigencias del motor y el ESC. Además este tipo de baterías son ligeras en comparación con otros tipos de baterías. Dentro de las baterías Li-Poly, se ha decidido elegir baterías con más de 2200 mAh, con el objetivo de aumentar el tiempo de vuelo. También es importante tener en cuenta la tasa máxima de descarga de las baterías, expresada en C. Si figuran dos, la baja significa que soporta xC de forma constante y la alta que soporta xC de forma puntual.

#### Zippy 4000



Imágenes 2.6.14

**Spec:****Capacity: 4000mAh****Voltage: 3S1P / 3Cell / 11.1v****Discharge: 30C Constant/40C Burst****Charge Rate: 3C****Weight: 342g (including wire, plug & case)****Dimensions: 137x47x39mm**

#### Nanotech 4000



Imágenes 2.6.15

**Specs:****Capacity: 4000mAh****Voltage: 3S2P / 6 Cell / 11.1V****Discharge: 15C Constant / 30C Burst****Weight: 296g (including wire, plug & case)****Dimensions: 107x35x31mm**

#### Multistar 4000



Imágenes 2.6.16

**Specs:****Minimum Capacity: 4000mAh****Configuration: 3S1P / 11.1V / 3Cell****Constant Discharge: 10C****Peak Discharge (10sec): 20C****Pack Weight: 244g****Pack Size: 112 x 34 x 30mm**

### TABLA DE DECISIÓN

	<u>Peso (gr)</u>		<u>C/C.Max</u>		<u>Capacidad (mAh)</u>		<u>Montaje</u>		<u>Precio (€)</u>		
Zippy 4000	342	1	30/40	4	4000	4	Fácil	4	28	2	15
Nanotech 4000	296	2	15/30	3	4000	4	Fácil	4	30	1	14
Multistar 4000	244	4	10/20	1	4000	4	Fácil	4	18	4	17

La calificación se ha hecho del 1-4, para dar una puntuación a las características más importantes.

\* La batería elegida es la Multistar 4000, que con un peso 244 gramos, nos ofrece el amperaje necesario para abastecer de corriente a los motores (40 A en constante y 80 A en pico de 10 segundos), incluso nos ofrece un tiempo de vuelo cercano a los 15 minutos. El montaje de la mismo es muy sencillo, solo necesita una superficie de apoyo. El precio también es un dato importante a tener en cuenta.



\*Para calcular el tiempo de vuelo aproximado se ha realizado el siguiente cálculo:

En el prototipo hay una batería Lipo de 4000 mAh a un voltaje nominal de 11.1 V. Debemos tener en cuenta el consumo de los motores, que son los grandes consumidores.

Consumo de los motores a máxima potencia:  $11.1 \text{ V} \cdot 15 \text{ A} = 166,5 \text{ W}$

Consumo total de los motores:  $166,5 \text{ W} \cdot 4 = 666 \text{ W}$

Tiempo de vuelo a máxima potencia:  $= E/P = 4\text{Ah} \cdot 11,1\text{V}/666\text{w} = 0,0667 \text{ h} = 4 \text{ min}$

Consumo de los motores al 75% potencia:  $8.3 \text{ V} \cdot 15 \text{ A} = 124.9 \text{ W}$

Consumo total de los motores:  $124.9 \text{ W} \cdot 4 = 500 \text{ W}$

Tiempo de vuelo a máxima potencia:  $= E/P = 4\text{Ah} \cdot 11.1\text{V}/500\text{w} = 0,0888 \text{ h} = 5 \text{ min}$

Consumo de los motores al 50% potencia:  $5.5 \text{ V} \cdot 15 \text{ A} = 82.5 \text{ W}$

Consumo total de los motores:  $82.5 \text{ W} \cdot 4 = 330 \text{ W}$

Tiempo de vuelo a máxima potencia:  $= E/P = 4\text{Ah} \cdot 11,1\text{V}/330\text{w} = 0,1345 \text{ h} = 8 \text{ min}$

**El tiempo estimado de vuelo estará comprendido entre los 5 y los 10 minutos aproximadamente.**

### SELECCIÓN CONTROLADORA.

La controladora seleccionada ha sido la Hobbyking KK2.1.5 Multi-Rotor LCD Flight Control Board With 6050MPU And Atmel 644PA, debido a que se busca una placa que integre como mínimo el magnetómetro, el acelerómetro y el giroscopio y que no precise de experiencia para su instalación y uso; y que nos permita tener una diagonal entre motores de entre 40 y 50 cm.

Esta controladora ha sido diseñada para el vuelo Multi-Rotor y el software que incorpora hace que la instalación y configuración sea asequible para todo tipo de usuarios.

La controladora, tiene como objetivo estabilizar la aeronave durante el vuelo y para ello necesita la señal del giroscopio 6050MPU, luego pasa esta señal a la Atmega644PA IC. La unidad Atmega644PA IC procesa estas señales según el firmware seleccionado por el usuario (Tricópteros, cuadricóptero, Hexacópteros, etc.) y pasa las señales de control a los controladores electrónicos de velocidad instalados (ESC). Estas señales ordenan a los ESC hacer ajustes precisos en la velocidad de rotación de motores que a su vez estabilizan el Multi-Rotor.

La placa de control HobbyKing KK2.1.5 Multi-Rotor también utiliza señales de su receptor de radio control (Rx) y pasa estas señales al IC Atmega644PA través de las entradas alerón, elevador, acelerador y el timón. Una vez que esta información ha sido procesada por el IC, este envía señales que varían de los ESC, que a su vez ajustan la velocidad de rotación de cada motor para inducir vuelo controlado (arriba, abajo, hacia atrás, hacia delante, izquierda, derecha, guiñada).

### Hobbyking KK2.1.5 Multi-Rotor LCD Flight (Precio 18€).



Imagen 2.6.17

#### **Specs:**

Size: 55mm x 55mm x 19mm

Weight: 32g

IC: Atmega644 PA

Gyro/Acc: 6050MPU InvenSense Inc.

Auto-level: Yes

Input Voltage: 4.8-6.0V

AVR interface: standard 6 pin.

Signal from Receiver: 1520us (5 channels)

Signal to ESC: 1520us

### SELECCIÓN PLACA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA.

Esta placa de distribución de energía útil tiene las mismas medidas en superficie que la controladora Multi-Rotor y es una solución efectiva para la distribución de energía a los motores. Sólo tiene que utilizar conectores de 2 mm macho para los ESC y conecte una batería.

Quadcopter Power Distribution Board Lite (Precio 3,5€).



Imagen 2.6.18

**Specs:**

**Size: 55mm x 55mm x 10mm**

**Weight: 19.3g (including wires)**

**Current: 4 x 20A Outputs (MAX)**

**Power Input: XT60 with 16AWG wire**

**Motor output: 4 x 2.0mm Female bullet plug**

**Aux output: 2 pin JST compatible**

### SELECCIÓN DEL RADIO CONTROL.

El radio control seleccionado es el Flysky FS-T6, porque se necesitan 5 canales o más para poder realizar el control del cuadricóptero, y éste dispone de 6 canales de transmisión, transmite a 2.4ghz que es el rango demandado por la controladora, nos permite además realizar vuelos hasta 100 metros de distancia y dispone de una pantalla Lcd Digital que facilita el control.

Radio control Flysky FS-T6 (Precio 50€).



Imagen 2.6.19

\*Las dimensiones de los componentes electrónicos las podemos ver en el anexo de planos (Ver plano nº9).

## 2.7 IDEAS DE DISEÑO

Después de analizar los puntos anteriores, y ver que no hay referencias en cuanto a realizar variaciones en la distancia entre rotores de los Cuadricópteros, se ha decidido darle especial importancia al diseño de los brazos, que permitirán unir físicamente los motores, que nos van a dar el empuje vertical, al centro de gravedad del cuadricóptero.

### DRON DE CARRERAS.

Estos cuadricópteros, tienen próximos su centro de gravedad a los centros de gravedad de los motores, con apenas unos 25-30 cm de distancia en diagonal, entre motor y motor. Esto permite a estas máquinas disponer de un vuelo muy ágil, algo nervioso, que ayuda al pilotaje extremo de las carreras. Con una capacidad de reacción en respuesta a las acciones del usuario, que permite realizar acrobacias, giros extremos, ascensos y descensos vertiginosos.



Imagen 2.7.1

### DRON DE GRABACIÓN.

Estos cuadricópteros, tienen alejado su centro de gravedad de los centros de gravedad de los motores, con una distancia en diagonal entre motor y motor, de unos 45-50 cm. Esto permite a estas máquinas disponer de un vuelo menos ágil, algo torpe, que ayuda al pilotaje estable, que se necesita para realizar grabaciones. Con una capacidad de reacción en respuesta a las acciones del usuario, que permite realizar giros suaves, desplazamientos muy estables, ascensos y descensos más controlados.



Imagen 2.7.2

\* La idea de desarrollar un dron que unifique ambas formas de vuelo, realizar grabaciones o carreras, nos exige realizar un chasis-soporte modular, que nos permita variar la distancia del centro de gravedad de la máquina al centro de gravedad de los rotores, de forma mecánica.

\* El desarrollo del producto siguiendo la idea de modular los brazos del cuadricóptero, se verá a continuación en la fase 3, respetando la elección realizada de la electrónica y respetando la hoja de requisitos redacta en el apartado 2.5

## **DESARROLLO DEL PRODUCTO.**

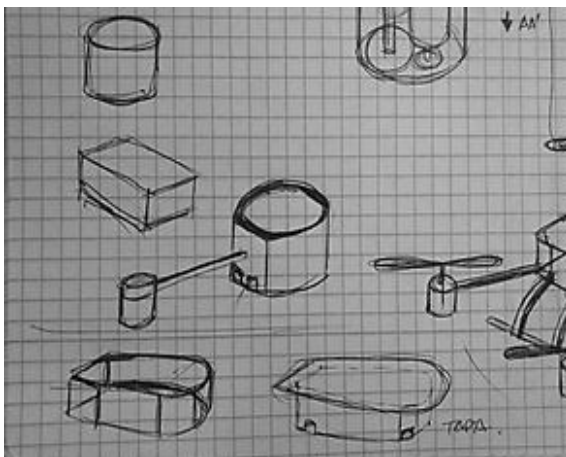
1. BOCETOS.
2. DISEÑO.
3. CÁLCULOS.
4. FABRICACIÓN 3D.

### 3.1 BOCETOS

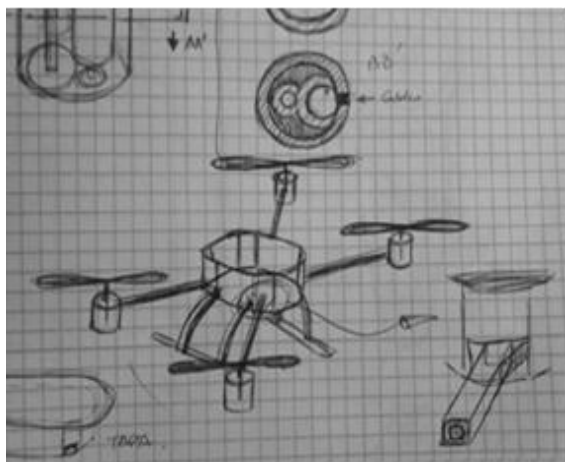
El primer paso de esta tercera fase, ha consistido en crear posibles geometrías para cada una de las diferentes partes que componen el chasis del cuadricóptero.

Los bocetos que se muestran a continuación comprenden las diferentes partes del cuadricóptero. Podemos ver el cuerpo central o fuselaje del cuadricóptero, que debe unir los cuatro brazos del dron, las dos patas, además de albergar la controladora, placa de potencia y batería, y todo ello con una ligereza y resistencia adecuadas. También podemos ver los brazos o alas del cuadricóptero (posibles formas y geometrías que puedan albergar los motores, variadores y cableado, que a la vez permitan un montaje y desmontaje sencillo. Por otro lado se pueden ver las patas, que deben proporcionar al dron una altura de despegue adecuada y una capacidad de absorber posibles impactos en los aterrizajes.

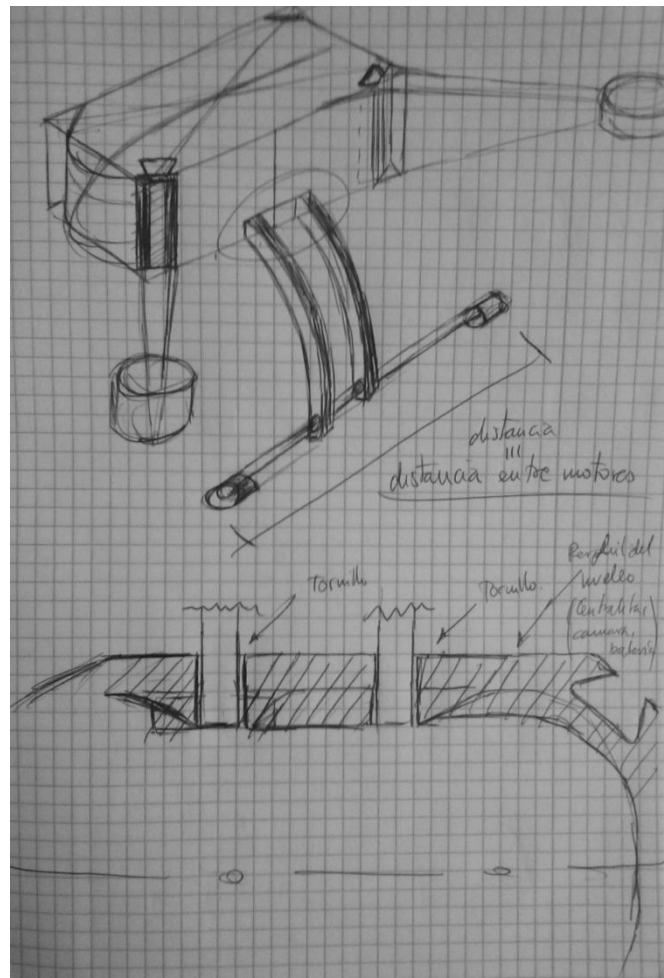
A continuación pueden verse algunos bocetos para el diseño del chasis soporte del dron, como resultado de una lluvia de ideas previa y la observación de los diseños existentes en el mercado.



Posibles formas del cuerpo central.

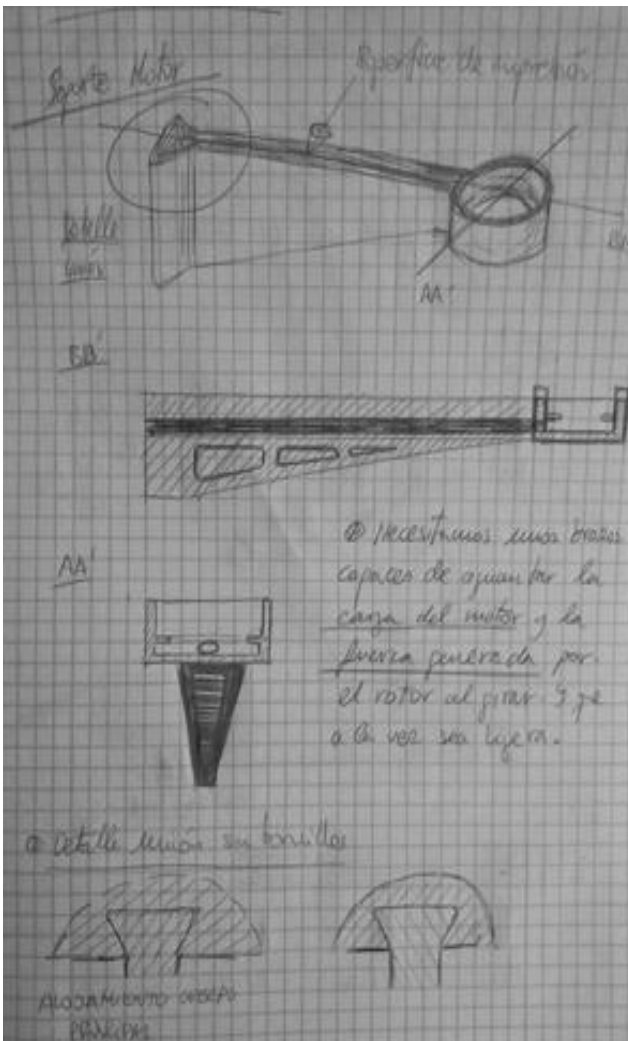


Apariencia que podría tener el cuadricóptero.

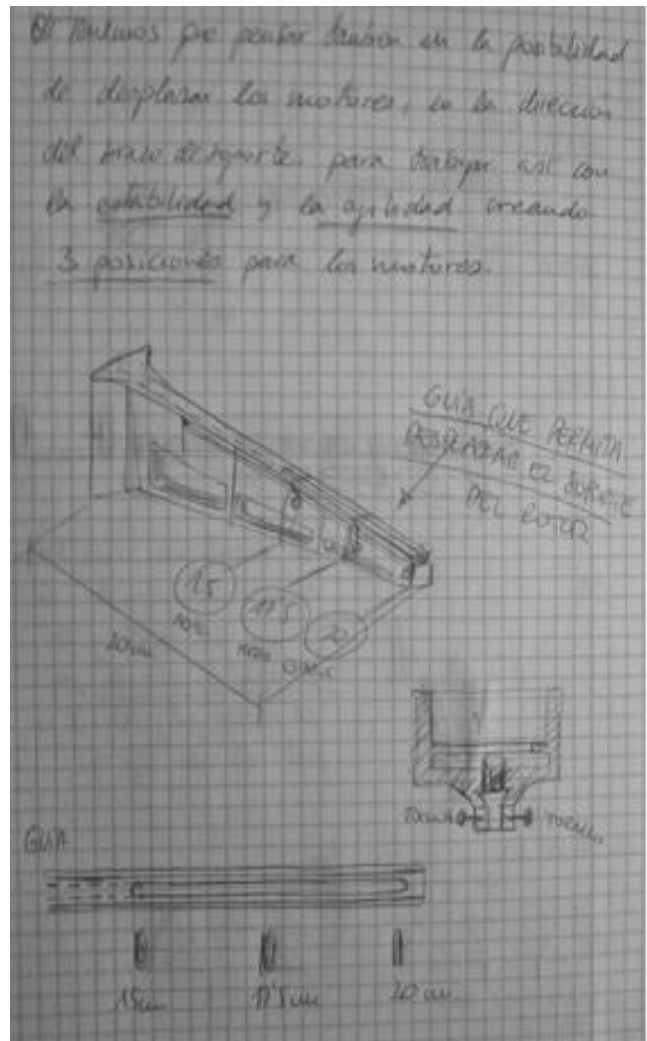


Posibles uniones entre el cuerpo y los brazos.

**Primera lluvia de ideas, de posibles uniones y diferentes formas del chasis soporte.**

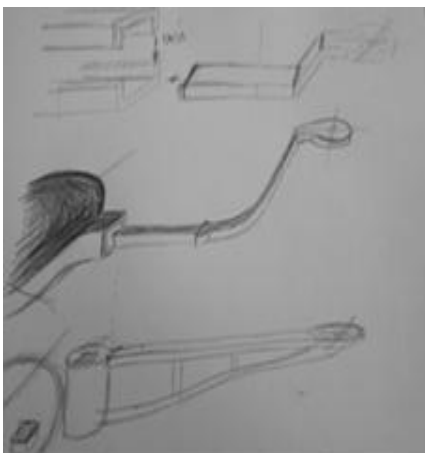


Forma que podría tener el brazo normal y la unión con el cuerpo.

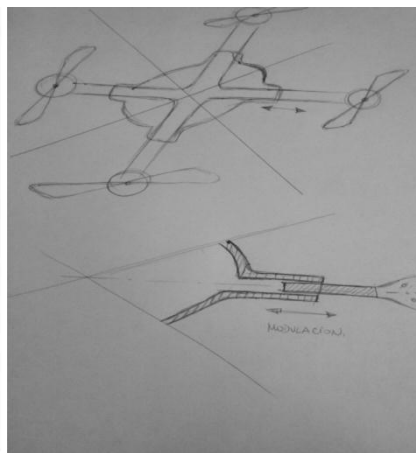


Forma que podría tener el brazo modular.

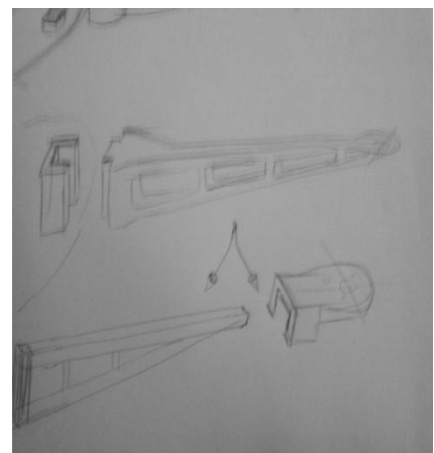
**Segunda lluvia de ideas, con posibles diseños de brazos, fijo y modulares.**



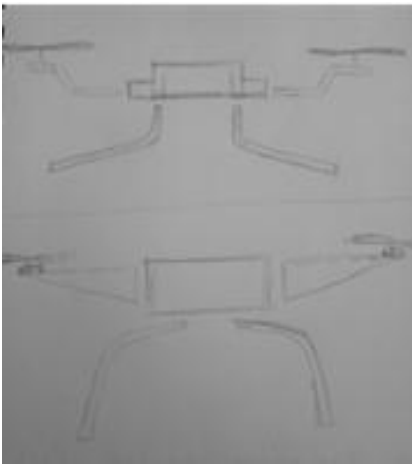
Posibles formas de los brazos.



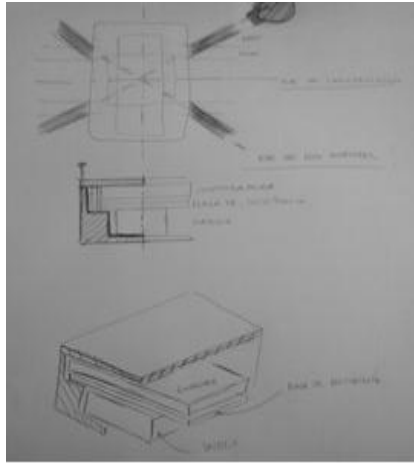
Posibles uniones entre el brazo y el cuerpo.



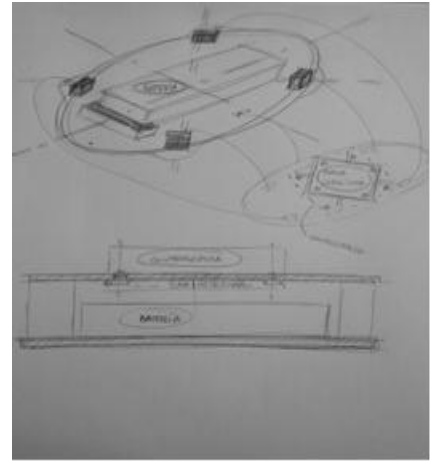
Posibles variantes de uniones.



Posibles formas de las patas.



Posibles alojamientos en el cuerpo.



Posibles alojamientos en el cuerpo.

**Ultima lluvia de ideas, de posibles uniones y diferentes formas del chasis soporte.**



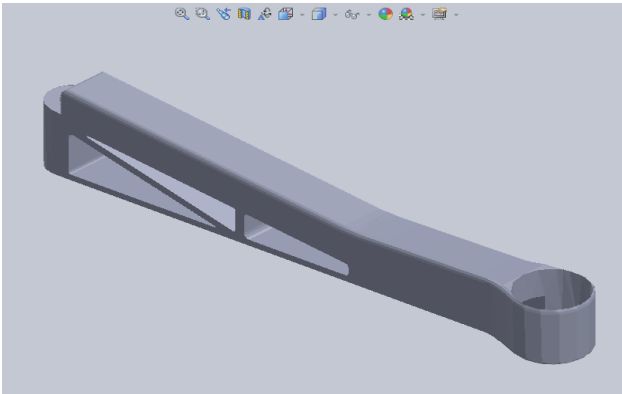
## 3.2 DISEÑOS

Los diseños se han realizado teniendo presentes las especificaciones propuestas, el análisis de las medidas de los componentes electrónicos seleccionados y las ideas de diseño de algunos de los bocetos realizados.

El primer diseño será el brazo del cuadricoptero, que deberá ser capaz de dar soporte a los motores, a los variadores y al cableado de los mismos; además de ser capaz de soportar y transmitir los esfuerzos generados por los motores.

### DISEÑO DEL BRAZO.

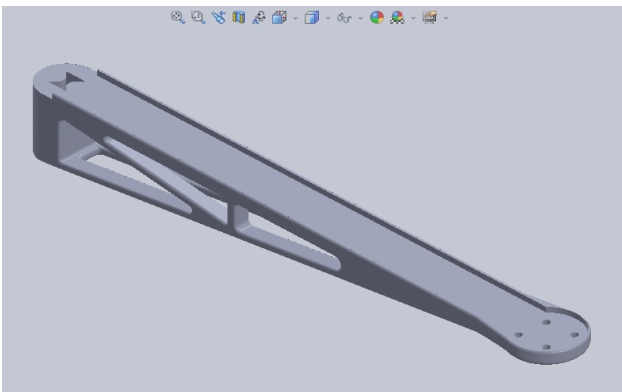
- **Primer diseño del brazo del cuadricoptero.**



Este primer diseño está basado principalmente en el diagrama del momento flector de una viga en voladizo aligerada, con una carga en el extremo.

Para continuar, creo un alojamiento a la medida del motor, una cavidad en el interior del brazo para el cableado y el variador.

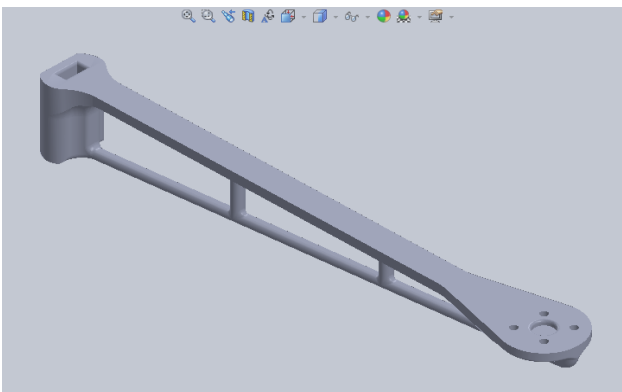
También se realizó un vaciado, en el extremo de unión del brazo con el cuerpo.



En esta modificación del primer diseño, se ha mantenido la forma del primer diseño, se han quitado todas aquellas partes, que aportan peso y no tienen ninguna función estructural.

Las partes que se han quitado, corresponden al hueco del motor y a la cavidad donde inicialmente estarían los cables y el variador de velocidad.

También se ha reducido la sección de los nervios del perfil.



En esta segunda modificación del primer diseño, se ha mantenido la base principal de apoyo, para el motor, el cableado y el variador.

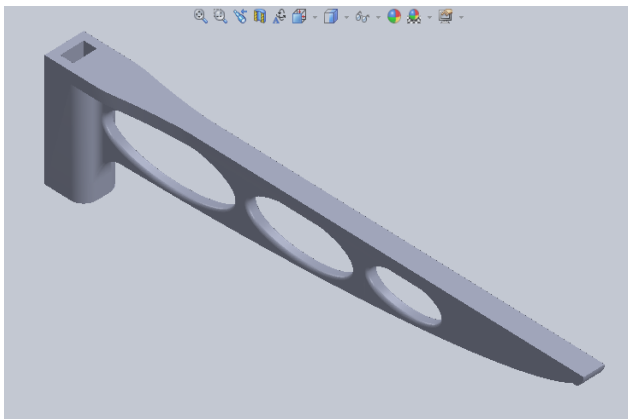
También se ha variado la forma de los nervios, reduciendo el peso del brazo y manteniendo la resistencia.

Se ha realizado un cálculo estático (Ver Cálculo diseño 1), para comprobar la resistencia del diseño.

*Después de realizar el primer diseño, se ha decidido realizar un segundo diseño que permita modular el cuadricoptero.*



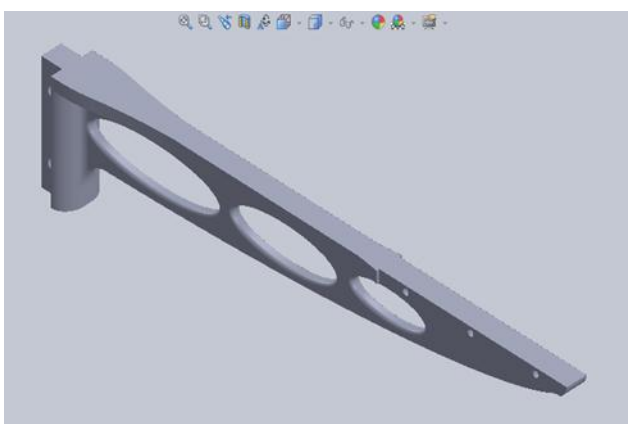
- **Segundo diseño del brazo del cuadricoptero.**



Este segundo diseño, parte de la idea anterior de crear una viga en voladizo, con un refuerzo, en forma de ménsula, que ayude a transmitir los esfuerzos.

Se ha reducido la plataforma de apoyo para el variador y los cables, y se ha aumentado la altura del soporte.

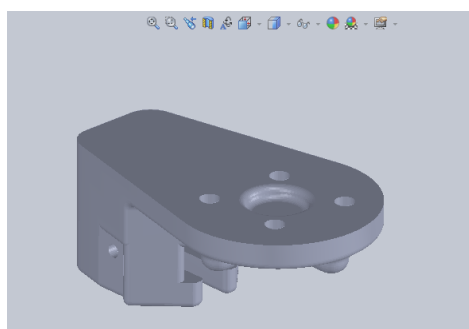
Esto se debe a la necesidad de crear una guía, que permita al soporte del motor desplazarse, variando así la distancia al centro de gravedad del cuadricóptero; y a la vez conservar la resistencia de la estructura.



Se ha decidido modificar el segundo diseño, mejorando la guía del brazo, al crear unos taladros que facilitan el posicionado del soporte del motor y un tope final.

Por otro lado se ha modificado el extremo del brazo, donde está la unión con el cuerpo. Se han creado unos taladros para asegurar la unión, y se ha modificado la su forma, para facilitar el montaje y desmontaje del brazo.

Se ha realizado un cálculo estático (Ver Cálculo diseño 2), para comprobar la resistencia del diseño.



*Diseño definitivo del brazo y del soporte para el motor.*

La idea de modular la distancia del motor al centro de gravedad del cuadricóptero, ha exigido separar el anclaje del motor de la estructura del brazo.

El sistema de guía planteado, ha permitido mantener un soporte adecuado para el cableado y el variador; y a la vez permite realizar las variaciones de longitud.

Los diseños se han realizado en paralelo con los cálculos, permitiendo así la mejora de los mismos.

En el anexo Planos (Ver planos nº 3 y 4), se pueden ver los planos de cada uno de los diseños finales del soporte y del brazo.

El segundo diseño será el de las patas, que elevara el fuselaje y brazos del cuadricoptero, ayudando al despegue y al aterrizaje.

### **DISEÑO DE LAS PATAS.**

- **Primer diseño de las patas del cuadricoptero.**



Este diseño está basado principalmente, en la idea de crear cuatro puntos de apoyo, uno debajo de cada uno de los brazos, para conseguir una base de apoyo en el aterrizaje lo más amplia posible.

Dar una altura mínima de 100mm, desde el motor hasta la superficie de despegue, para asegurar un funcionamiento óptimo de los motores.

La idea de crear dos patas y situarlas en cruz, se descartó por la fragilidad que ocasionaba la entalla, creada para montar las patas.

*Diseño descartado de las patas.*

- **Segundo diseño de las patas del cuadricoptero.**



Este segundo diseño se ha basado principalmente, en la idea anterior, con la idea de crear una base de apoyo.

Manteniendo la altura mínima de 100mm, desde el motor hasta la superficie de despegue.

Se ha modificado ligeramente el diseño de las patas y se han creado finalmente cuatro patas iguales, pero independientes.

Se ha evitado el problema de montaje y resolviendo el problema mencionado en el anterior diseño.

Y se han creado dos taladros más, para la colocación del soporte de una cámara.

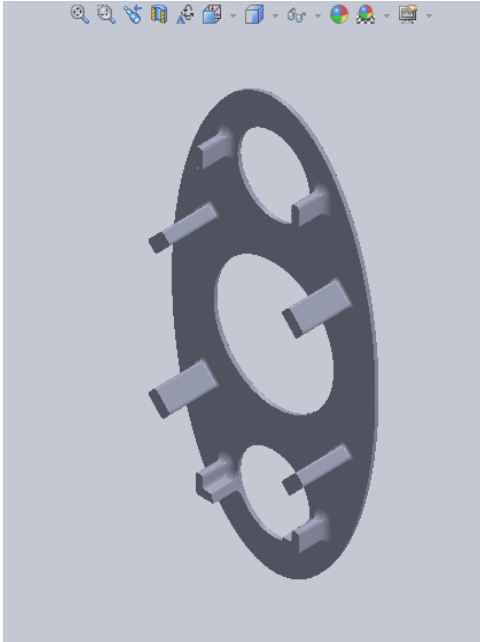
*Diseño definitivo de las patas.*

En el anexo Planos (Ver plano nº7), se pueden ver los planos del diseño final.

El tercer diseño será la estructura principal/fuselaje, que deberá permitir el anclaje de la batería, la controladora y la placa de distribución de energía. También se tendrá en cuenta la unión de los brazos y la unión de las patas.

### DISEÑO DEL FUSELAJE.

- **Primer diseño del cuerpo del cuadricoptero.**

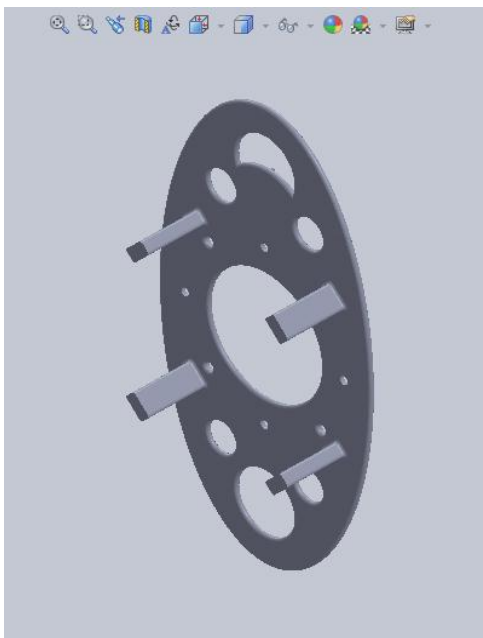


Este diseño corresponde a la parte inferior del cuerpo, que se ha decidido dividir en dos partes, siguiendo la idea de diseño de uno de los bocetos, que tiene como principal objetivo, facilitar el montaje y desmontaje del cuadricóptero.

Debe ser capaz de alojar las uniones de los brazos, facilitando el montaje y el desmontaje de los mismos y a la vez orientar de forma adecuada cada uno de los brazos respecto del centro de gravedad del cuerpo.

Había que conseguir también una base ligera y resistente, que permita dar soporte a la batería y que a su vez este ventilada, favoreciendo un buen funcionamiento.

La idea de dividir el cuerpo en dos partes facilita el montaje del resto de la electrónica.



Este diseño corresponde a la parte superior del cuerpo, que completa la estructura central.

Debe ser capaz de alojar las uniones de los brazos, facilitando el montaje y el desmontaje de los mismos y a la vez orientar de forma adecuada cada uno de los brazos respecto del centro de gravedad del cuerpo.

Había que conseguir también una base ligera y resistente, que permita dar soporte a la controladora y la placa de distribución de potencia y que a su vez este ventilada, favoreciendo un buen funcionamiento.

La idea de dividir el cuerpo en dos partes facilita el montaje del resto de la electrónica.

*Después de realizar el primer diseño, se ha decidido realizar unas modificaciones, en las uniones con los brazos y en el soporte de las mismas.*

- **Segundo diseño del cuerpo del quadricóptero.**

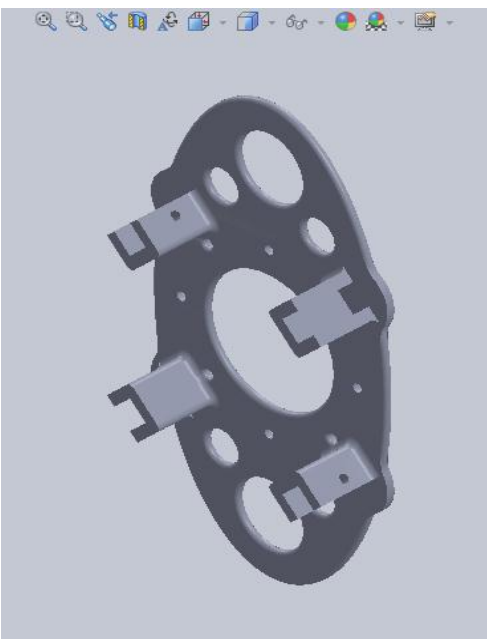


Este diseño corresponde a la parte inferior del cuerpo. Siguiendo con la idea del primer diseño, se ha modificado la geometría de las uniones, entre el cuerpo y los brazos, aumentando la superficie de contacto entre las piezas y manteniendo la idea de facilitar el montaje y desmontaje del quadricóptero.

Además permite orientar de forma más adecuada cada uno de los brazos respecto del centro de gravedad del cuerpo.

También se ha conseguido aligerar algo más la base sin restarle resistencia a la estructura y dando soporte a la batería y que a su vez está más ventilada, favoreciendo un buen funcionamiento.

Se han creado nuevos puntos de anclaje para las patas y el soporte de la cámara.



Este diseño corresponde a la parte superior del cuerpo, que completa la estructura central.

Siguiendo con la idea del primer diseño, se ha modificado la geometría de las uniones, entre el cuerpo y los brazos, aumentando la superficie de contacto entre las piezas, manteniendo la idea de facilitar el montaje y desmontaje del quadricóptero y orientando de forma adecuada cada uno de los brazos respecto del centro de gravedad del cuerpo.

Había que conseguir también una base ligera y resistente, que permita dar soporte a la controladora y la placa de distribución de potencia y que a su vez este ventilada, favoreciendo un buen funcionamiento.

La idea de dividir el cuerpo en dos partes facilita el montaje del resto de la electrónica.

*Diseño definitivo de las dos partes que componen el cuerpo.*

En el anexo Planos (Ver planos nº 5 y 6), se pueden ver los planos de cada uno de los diseños finales.

### 3.3 CÁLCULOS

Las piezas objeto de estudio, debido a la exigencia a la que están sometidas, son el brazo y el cuerpo del cuadricóptero, que son las partes de la estructura, que unidas entre sí crean el chasis-soporte del cuadricóptero.

Los cálculos se han realizado en paralelo a los diseños, permitiendo así obtener un diseño lo más ligero posible a la vez que resistente y que nos permita a la vez cumplir con las especificaciones propuestas.

Se ha decidido someter las piezas a ensayos estáticos, que nos muestran diagramas de colores en 3D, de las tensiones máximas que soportan las piezas y de los desplazamientos que sufren debido a las fuerzas a las que están sometidas.

Los esfuerzos más importantes que debemos considerar, para realizar este estudio, son los generados por los motores. Cada uno de ellos es capaz de generar 12,5 N de fuerza de sustentación (Ver imagen 3.3.1), en su par máximo de accionamiento. Por lo que, se ha decidido tomar como el esfuerzo principal, a la hora de realizar los cálculos estáticos.

Revoluciones motor:	w=	250	(rpm)
Constante sustentación hélice:	k=	0,0002	(kg · *m/rev2)
Fuerza de sustentación conservativa (Propulsión hélice)	F <sub>s</sub> =	12,5	(N)

Imagen 3.3.1

Estos cálculos tienen como objetivo ayudar a mejorar el diseño de las piezas, manteniendo la capacidad resistente demandada para dar el servicio esperado.

Se ha decidido fabricar las piezas en PLA. Es un material que funciona muy bien en la fabricación por filamento fundido, es biodegradable y además nos ofrece unas buenas características mecánicas (ver imagen 3.3.1).

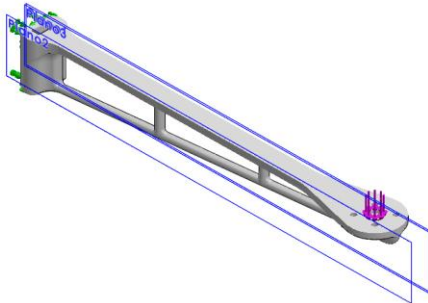
- Densidad: 1,25 g/cm <sup>3</sup>
- Módulo de elasticidad (Young): 3,5 GPa
- Elongación a la rotura: 6%
- Módulo de flexión: 4 GPa
- Resistencia a la flexión: 80 MPa
- Temperatura de transición vítrea: 60°C
- Temperatura de deflexión del calor (a 455 kPa): 65°C
- Comienzo de fusión: 160°C
- Módulo de corte: 2,4 GPa
- Capacidad calorífica específica: 1800 J/kg-K
- Relación fuerza-peso: 40 kN-m/kg
- Resistencia a la tracción (UTS): 50 MPa
- Conductividad térmica: 0,13 W/m-K

Imagen 3.3.2

Propiedades	
Nombre:	<b>PLA (1)</b>
Tipo de modelo:	<b>Isotrópico elástico lineal</b>
Criterio de error predeterminado:	<b>Tensión de von Mises máx.</b>
Límite elástico:	<b>2.4e+008 N/m<sup>2</sup></b>
Límite de tracción:	<b>5e+007 N/m<sup>2</sup></b>
Límite de compresión:	<b>9.3e+007 N/m<sup>2</sup></b>
Módulo elástico:	<b>3.5e+009 N/m<sup>2</sup></b>
Coefficiente de Poisson:	<b>0.3</b>
Densidad:	<b>1250 kg/m<sup>3</sup></b>
Módulo cortante:	<b>2.4e+009 N/m<sup>2</sup></b>

Características asignadas al material.

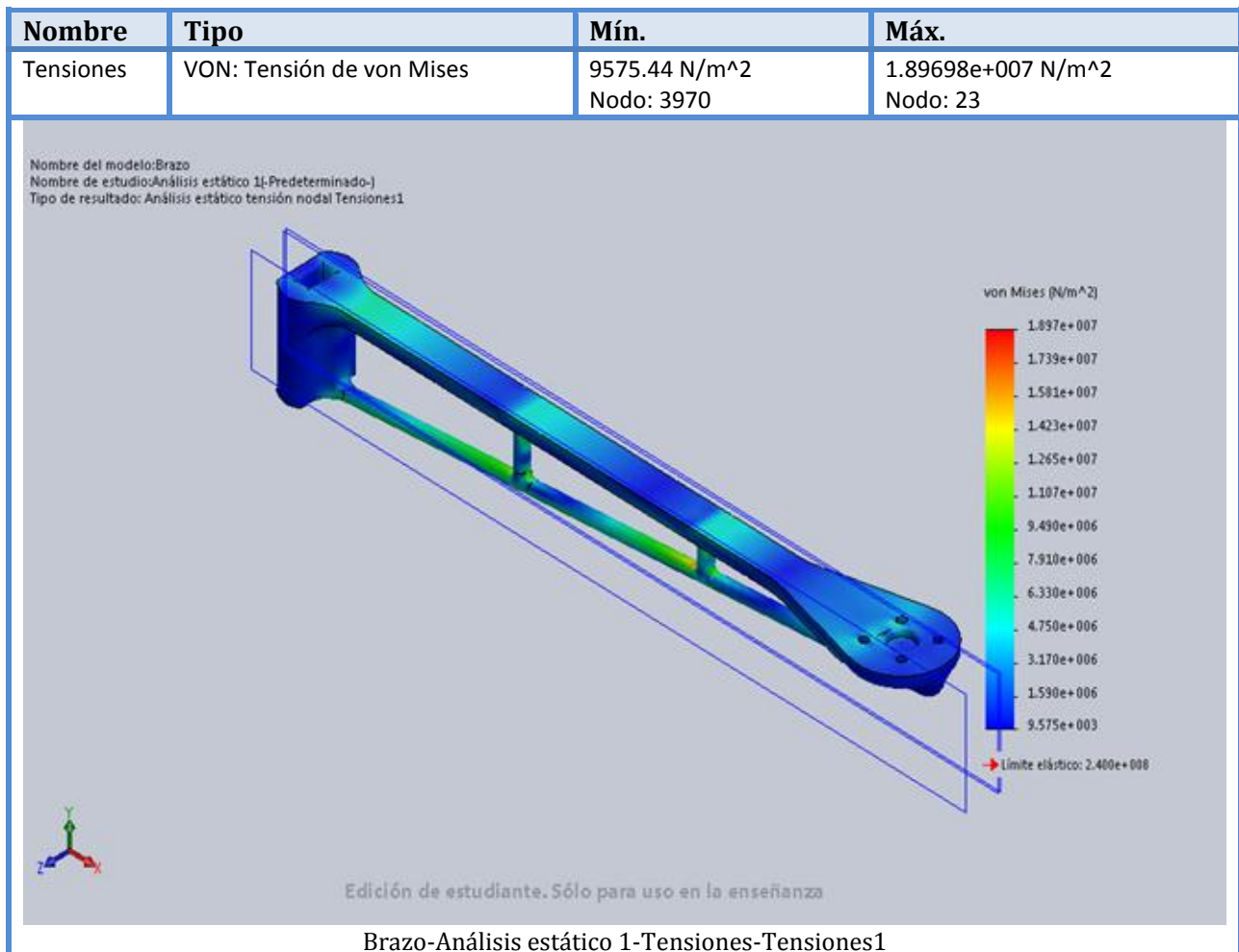
Estas son algunas de las propiedades que se han empleado, para crear el material en la biblioteca del programa de cálculo.

**CALCULO DEL BRAZO.****Cálculo diseño 1**Propiedades de la pieza:

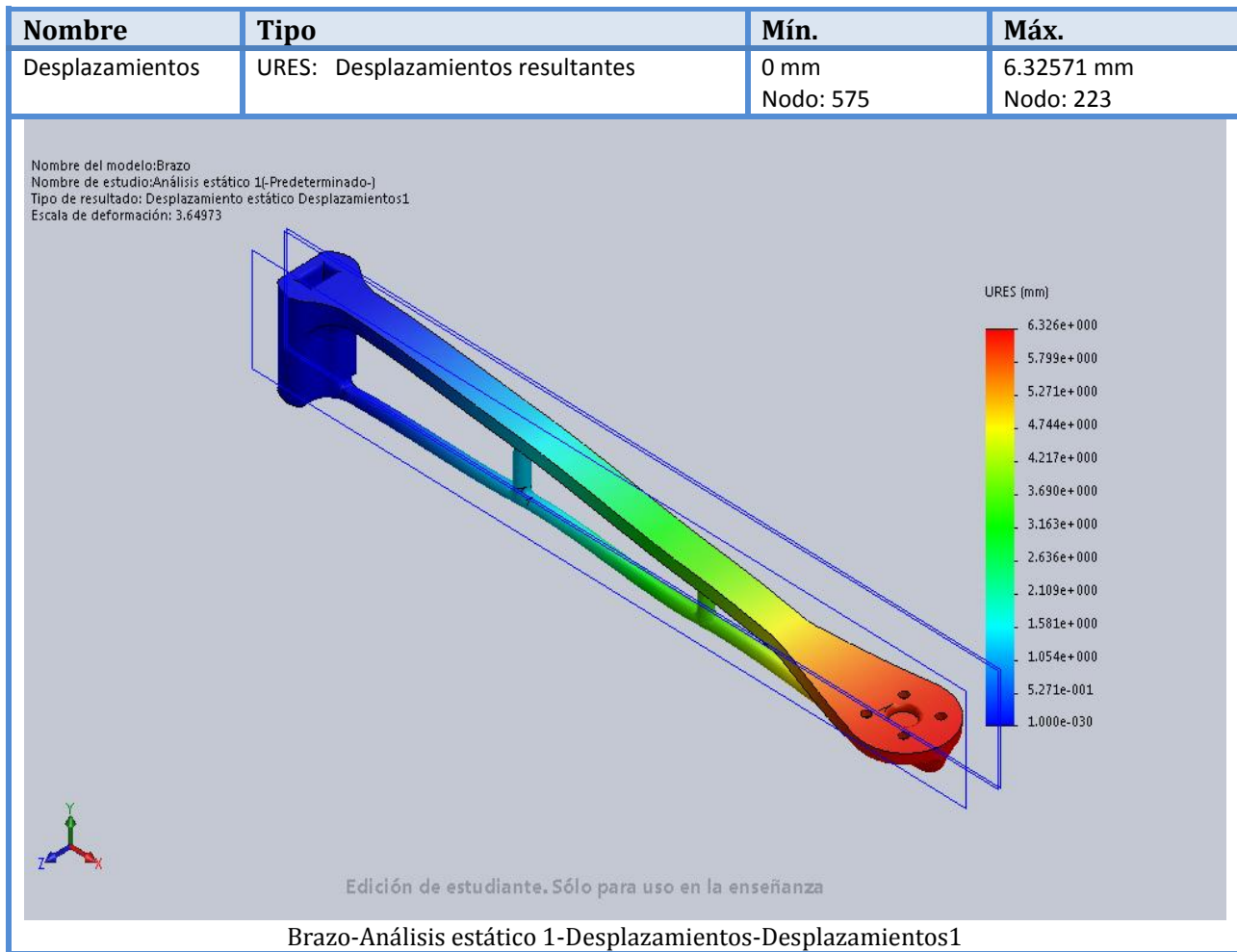
Masa:0.0238803 kg

Volumen:2.34121e-005 m<sup>3</sup>Densidad:1020 kg/m<sup>3</sup>

Peso:0.234027 N



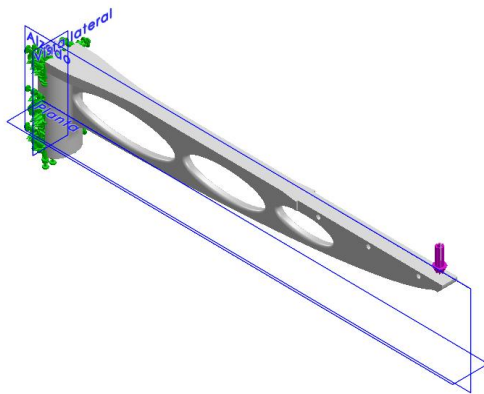
El programa de cálculo nos muestra los puntos frágiles de la pieza, en los nudos de los tirantes.



El programa de cálculo nos muestra una deformación de 6 mm en el punto más desfavorable del brazo, por lo que vamos a realizar un nuevo diseño, que sea capaz de mejorarlo.



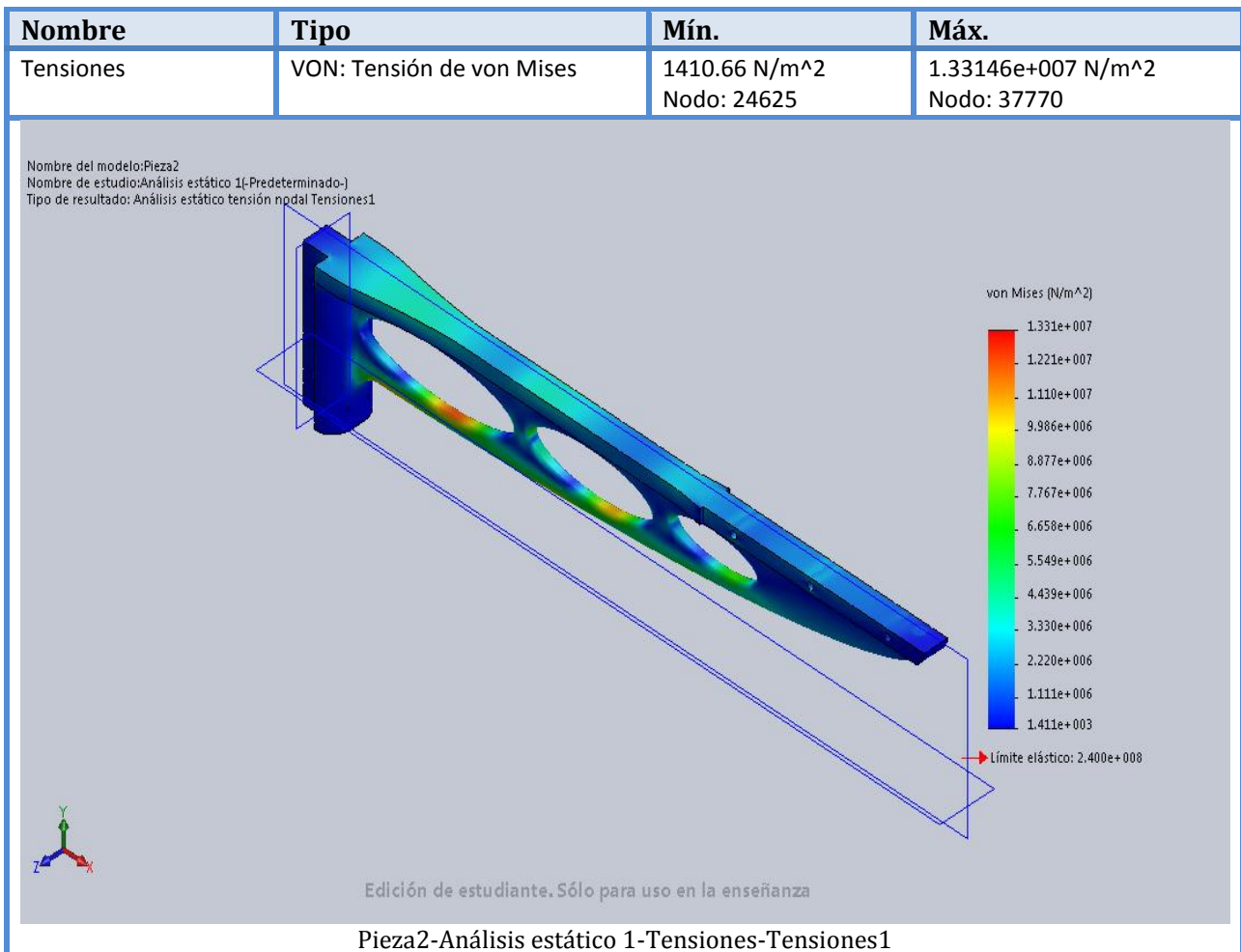
## Cálculo diseño 2

Propiedades de la pieza:

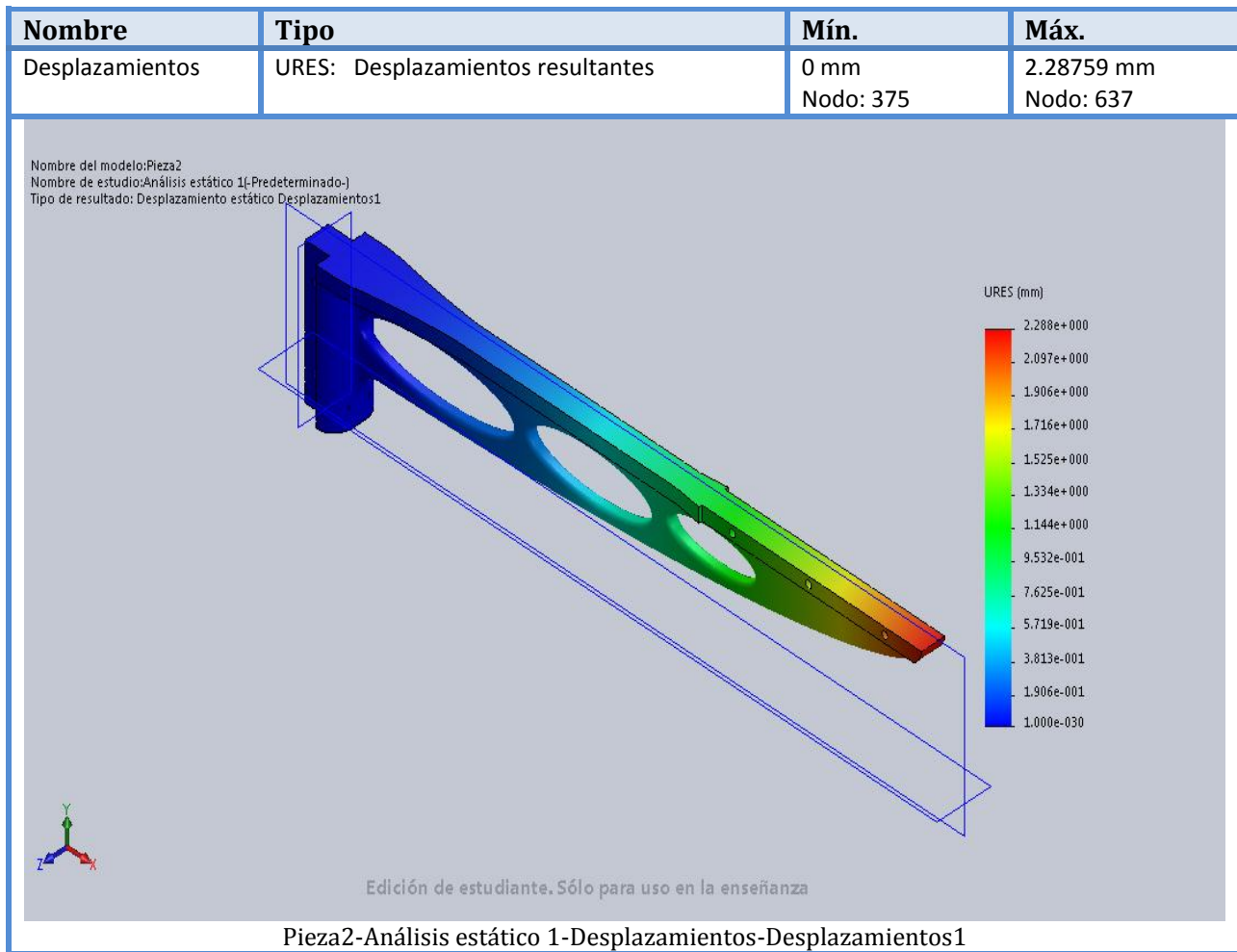
Masa:0.0228187 kg

Volumen:1.8255e-005 m<sup>3</sup>Densidad:1250 kg/m<sup>3</sup>

Peso:0.223623 N

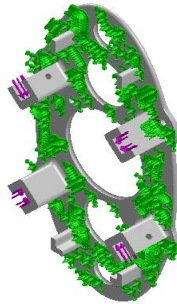


El programa de cálculo nos muestra los puntos frágiles de la pieza, que se han desplazado desde los nudos de los tirantes a los propios tirantes, gracias al cambio realizado en la geometría.



El programa de cálculo nos muestra una deformación de 2,3 mm en el punto más desfavorable del brazo, por lo que se ha mejorado notablemente la capacidad de resistir los esfuerzos de la pieza.

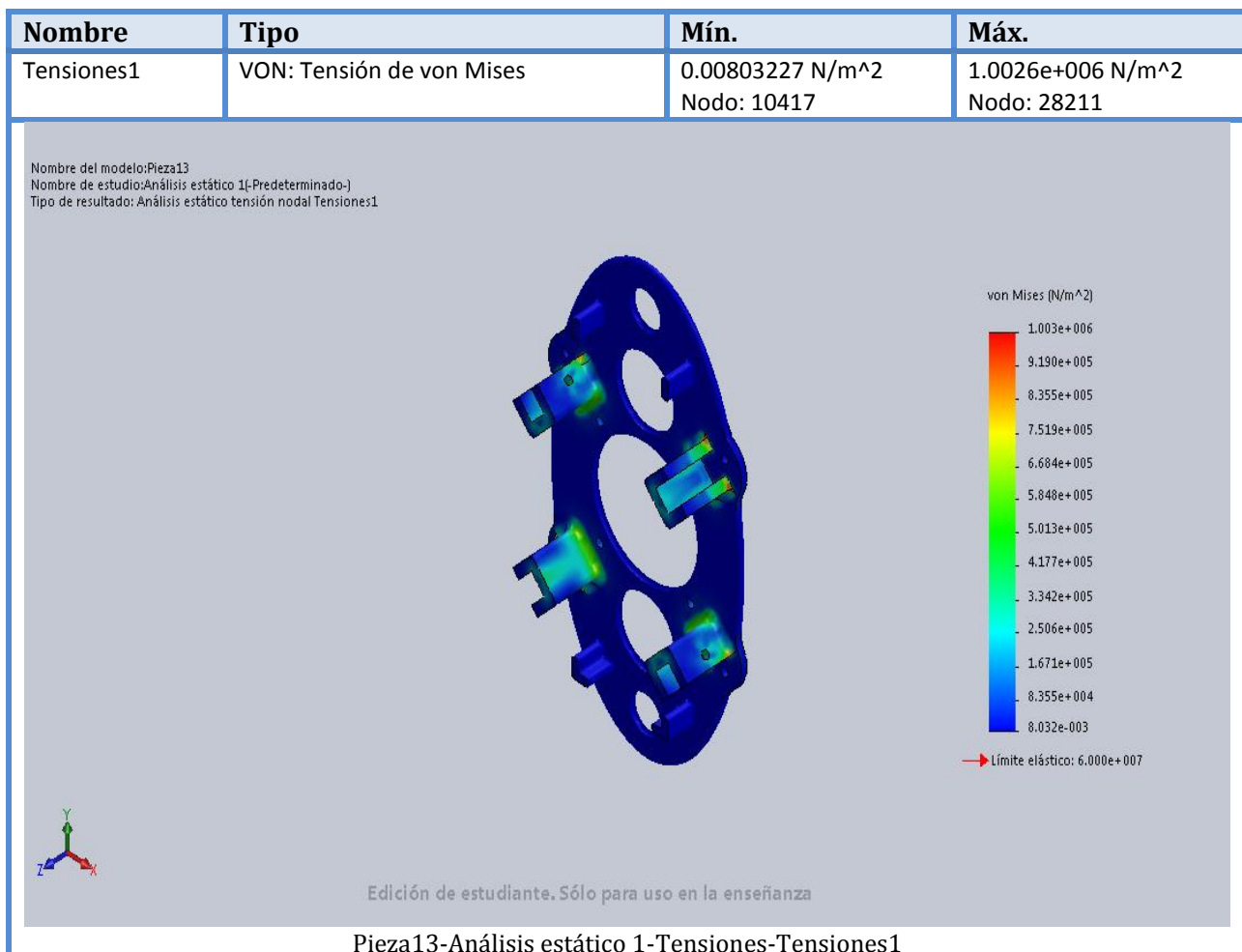
Solo se ha realizado el cálculo del brazo, sin tener en cuenta el soporte del motor, debido a que es un bloque, que está unido al brazo de forma mecánica.

**CALCULO DEL CUERPO.****Diseño 1**Propiedades de la pieza:

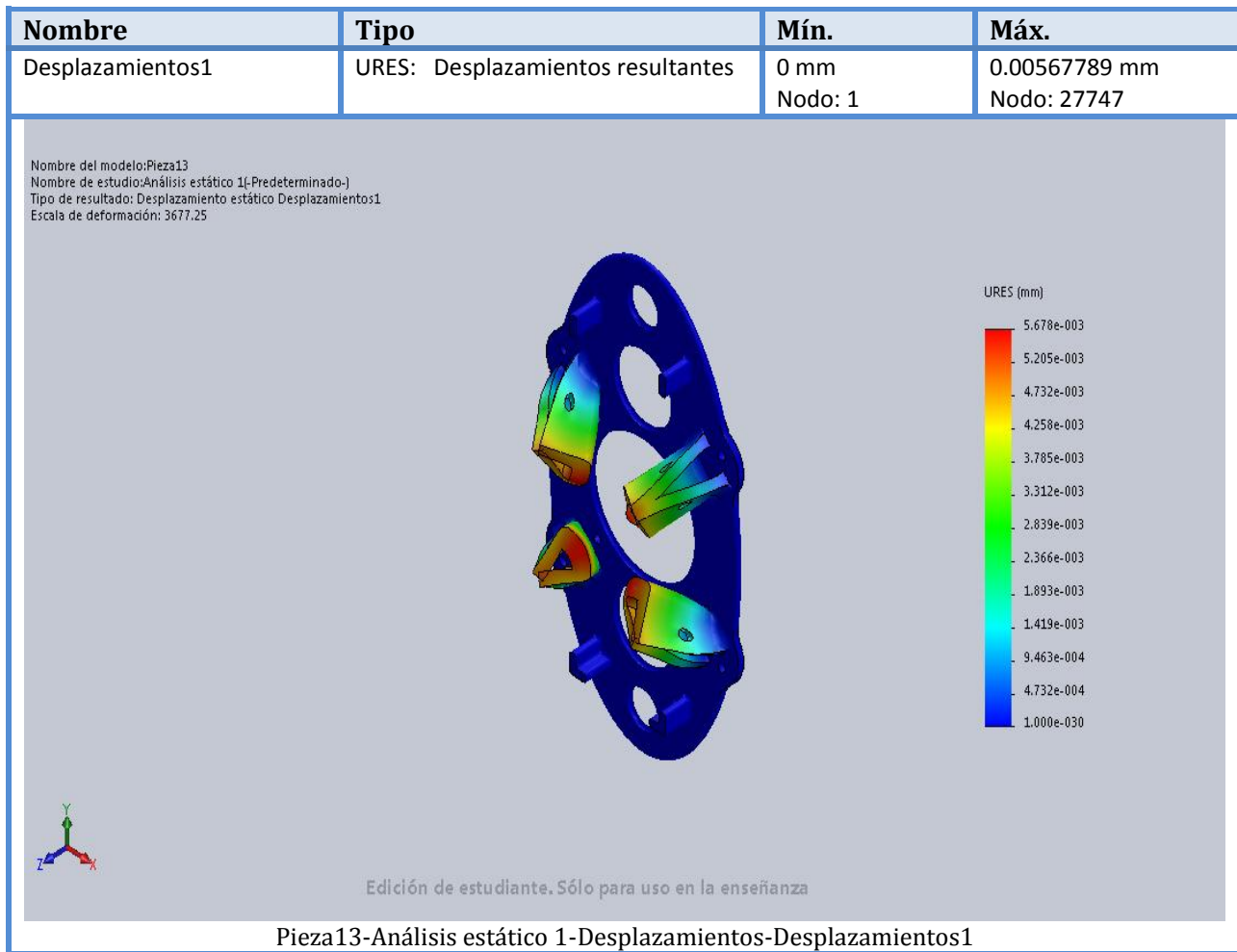
Masa:0.0373152 kg

Volumen:2.98522e-005 m<sup>3</sup>Densidad:1250 kg/m<sup>3</sup>

Peso:0.365689 N



El programa de cálculo nos muestra los puntos frágiles de la pieza, que se encuentran en las intersecciones, entre la unión con el brazo y la plataforma de anclaje de la electrónica. Y debido a la suposición impuesta de que la plataforma es rígida, lo cual no es cierto, pero era la forma en que el programa permitía evaluar los esfuerzos.



El programa de cálculo nos muestra una deformación que no llega a 1 mm en el punto más desfavorable de la unión entre el brazo y el cuerpo.

Solo se ha realizado el cálculo de la mitad inferior del cuerpo, debido a la similitud de las piezas.

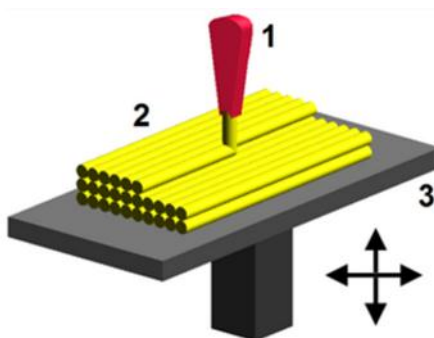
## 3.4 FABRICACIÓN 3D

La tecnología que ha popularizado este método de fabricación en 3D, ha sido la que se conoce como “Fusion Deposition Modeling” (FDM), que fue inventada y patentada a finales de los años 80 por Scott Crump. La empezó a comercializar a través de la empresa que fundó junto con su mujer, Stratasys que a día de hoy es una de las empresas más importantes dentro del sector.

La tecnología FDM estaba protegida por patente, lo que impulso el nacimiento de una nueva tecnología que en esencia es similar, “Fused Filament Fabrication” (FFF). Es una tecnología que permite conseguir piezas utilizando plástico ABS o bien PLA. El material que se utiliza para realizar la fabricación se puede encontrar con dos diámetros (1,75 y 3mm) y se suministra como un hilo en bobinas.

La impresión con esta tecnología comienza desde la capa inferior, creando una superficie en la base de construcción, que será decisiva para conseguir obtener una geometría de construcción fiel a la geometría de diseño. Esta primera capa debe estar bien adherida a la base de construcción, ya que sobre ella seguirán depositándose el resto de capas. La base de construcción o bien el carro de soporte del extrusor ascienden una altura determinada (espesor de capa), permitiendo así volver a depositar otra capa de material sobre la anterior y así hasta terminar la pieza.

El proceso de alimentación y fusión del material comienza introduciendo el hilo de plástico en el extrusor. El hilo pasa por un sistema de tracción (avanza o retrocede controlando la alimentación de material) que empuja el hilo al interior de un tubo metálico (que tiene función de embolo). Cuando el hilo llega al extremo del tubo, se encuentra un dispositivo que rodea por el exterior al tubo (bloque que aloja una resistencia que eleva la temperatura y un sensor para controlarla), que calienta el material hasta el punto de fusión (240°C para el ABS y 220°C para el PLA). El plástico sale fundido por la boquilla del extrusor (diámetro de 0,4mm) y se deposita en la posición correspondiente de la capa que se está imprimiendo.



1. Extrusor / 2. Material depositado / 3. Ejes de movimiento

Imagen 3.4.1

El sistema de control de las impresoras 3D, está basado en una máquina de control numérico. Estos sistemas necesitan un archivo con un formato .gcode, que determina cada punto de la geometría con 3 puntos (X,Y,Z). Esto permite al sistema de control mover los diferentes motores que controlan los 3 ejes de movimiento (X, Y, Z) de la máquina, así como el motor que controla la alimentación del material. En los ejes de cada motor podemos encontrar poleas y unidas a estas correas (con pasos de 0,2 mm) que permiten controlar con precisión los desplazamientos de la máquina. Todo esto permite dibujar las geometrías con precisión, capa a capa, obteniendo prototipos de rápida creación, que presentan buenas características mecánicas, aunque la calidad dimensional tenga pequeñas desviaciones.

## DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN POR FFF.

### Preparación del formato y características del archivo que contiene la geometría de la pieza.

Para poder imprimir un modelo 3D, éste tiene que estar generado por una superficie cerrada y continua, el objeto debe estar hecho de una sola pieza y la geometría no debe presentar espesores menores a 1 milímetro, por motivos de tolerancias dimensionales y capacidad de fabricación de las maquinas 3D comerciales.

Una vez creado el archivo 3D de la pieza, se debe guardar en formato .stl, que es el formato de archivo que procesa el programa de control de las impresoras 3D.

El programa divide en finas capas, de 0,25mm de espesor, la geometría del modelo (proceso llamado "Slicer" que crea las diferentes secciones en planta de la geometría), lo que permite que posteriormente transforme el archivo a un formato .gcode (éste formato da una descripción de 3 coordenadas para cada punto, que permite a la impresora dibujar las trayectorias que describen las secciones/capas que conforman la geometría de la pieza, además de valores de temperatura del material, avance o retroceso del sistema de tracción del hilo). Éste será el archivo que cargaremos a la máquina para que pueda realizar el trabajo.

Antes de guardar el archivo de construcción en formato .gcode, se deben fijar una serie de parámetros que definirán el resultado final de la fabricación.

### Material y temperatura.

- PLA: es un plástico biodegradable elaborado con el ácido poli-láctico que se obtiene de recursos naturales como la patata o el maíz. Es un plástico rígido con buenas propiedades mecánicas, algo más frágil y menos duro que el ABS. Es costoso mecanizarlo, pero presenta una consistencia más fluida a temperatura de extrusión (180-220°C). Es un plástico con el cual las impresoras 3D pueden trabajar con gran calidad, sin necesidad de calentar la plataforma de construcción.

- ABS: es el plástico de la ingeniería, el acrilonitrilo butadieno estireno, es muy resistente al impacto y es un termoplástico amorfo. Se trata de un plástico muy tenaz, además de ser muy duro, rígido y de tener una buena resistencia a la abrasión. Se puede mecanizar fácilmente y es soluble en compuestos como la acetona. Presenta una consistencia más fluida a temperatura de extrusión (240-250°C). Es un plástico que necesita de una plataforma de construcción que aporte temperatura (100°C) para poder realizar construcciones óptimas.

La elección de un material, nos fijara los parámetros de temperatura de extrusión, así como la temperatura de la plataforma de construcción.

### Espesor de capa.

El espesor de capa óptimo para realizar construcciones es de 0,25 mm, pero podemos aumentar o disminuir este valor, dependiendo de la boquilla del extrusor.

### Capas del perímetro de la pieza.

La cantidad de capas que se crean en el perímetro de la pieza confiere una mayor o menor consistencia, además de aportar a la construcción mayor o menor solidez externa. Este parámetro permite crear una cascara de una o varias capas, que marcan el comienzo del relleno de la pieza. La elección del número de capas que conforman la cascara de la pieza dependerá de su uso final y de la cantidad de ajustes superficiales, que se quieran realizar en la pieza.

El mínimo de capas recomendadas para que la pieza tenga una consistencia óptima son dos, y elevar el número de capas dependerá del uso final de la pieza.

### Relleno de tu pieza.

El relleno de la pieza esta expresado en porcentaje, siendo 0% hueco y 100% macizo. La elección del relleno está basada en función de la actividad a la que va a ser sometida la pieza.

Una pieza que vaya a estar sometida a algún tipo de esfuerzo debería ser maciza, con porcentajes mayores de un 80%, para obtener una mayor resistencia de la pieza. Por otro lado una pieza de adorno que no va a ser sometida a ningún esfuerzo debería ser lo más hueca posible, con porcentajes que no sean inferiores al 50%, para obtener una pieza lo más ligera posible, conservando una geometría original y sin deformaciones.

La elección de un porcentaje de relleno, estará definida por el uso final de la pieza.

### Soportes

Las partes del modelo que no están en contacto con la plataforma de construcción necesitan un soporte, que haga de base para que la impresora 3D pueda realizarlas de una forma óptima. Los soportes hacen posible realizar partes de la pieza que se encuentren en suspensión o voladizo respecto de la plataforma de construcción.

Hay que estudiar la posición correcta de construcción dentro de la máquina, para usar la menor cantidad posible de soportes y asignarlos a superficies que no formen parte de un mecanismo o superficies que necesiten un acabado estético.

Los modelos que necesiten soportes para su fabricación aumentarán la cantidad de material necesario y el tiempo para su construcción.

Una vez fijados los parámetros de construcción, el programa nos ofrece datos sobre el tiempo total y la cantidad de material necesario para realizar la construcción.

### **Preparación de la máquina para la construcción.**

*Para realizar los siguientes trabajos deberemos hacer uso de unos guantes y unas gafas de protección, para prevenir posibles lesiones (Ver anexo Imágenes 6.2.5)*

Las dimensiones máximas de impresión son de 20 cm de ancho por 29 cm de largo por 19 cm de alto. Es muy importante que la geometría de la pieza no supere las dimensiones máximas de impresión.

Primero hay que nivelar la plataforma de construcción consiguiendo un plano nivelado, que permita realizar la fabricación de la pieza de forma correcta.

En segundo lugar hay que cargar el material seleccionado, colocando la bobina de material en el soporte que presenta la impresora 3D, para facilitar la alimentación del hilo al extrusor. Después hay que coger el extremo del hilo, realizar un corte en bisel e insertar el hilo en el sistema de tracción del extrusor.

Después hay que precalentar el extrusor, permitiendo cebar el interior del extrusor de material, consiguiendo así, que la alimentación sea continuada desde el inicio de la impresión.

Por ultimo debemos aplicar un producto adherente a la plataforma de construcción, que ayude a fijar la primera capa de impresión a la superficie de la plataforma. Este paso es muy importante para evitar que las retracciones del material, debido al cambio de temperatura, puedan levantar la primera capa de la pieza, originando imperfecciones geométricas, debido a la variación de altura entre la boquilla y la capa inferior de material.



### **Puesta en marcha de la máquina.**

Para pasar el archivo de construcción de la pieza (en formato .gcode), debemos guardar el archivo desde el ordenador en una tarjeta SD y conectarla al display de la impresora 3D.

Después hay que seleccionar el archivo que se quiere construir y lanzar la construcción.

### **Extracción y limpieza de soportes.**

Ver Anexo de Imágenes 6.2.1 y 6.2.2, para ver piezas con los soportes sin quitar.

*Para realizar los siguientes trabajos deberemos hacer uso de unos guantes y unas gafas de protección, para prevenir posibles lesiones (Ver anexo de imágenes 6.2.5).*

Una vez terminada la construcción de la pieza, se extrae la plataforma de construcción de la máquina, facilitando así la separación de la pieza y la plataforma. Para separar la pieza se coloca la plataforma sobre una superficie plana. Con la ayuda de una espátula y sujetando la pieza, se procede a separar cuidadosamente la pieza.

Si la pieza presenta soportes, hay que limpiarlos. Para realizar este trabajo se recomienda hacer uso de unos alicates de corte y de un cúter, que ayudaran a separar los soportes de la pieza. (Ver anexo de imágenes 6.2.4.2)

### **Inspección visual, medición y verificación.**

Antes de realizar la extracción ya se puede observar si la pieza se ha separado de la plataforma de construcción. El siguiente paso, con los soportes ya eliminados, es inspeccionar visualmente la pieza, para buscar posibles defectos en el proceso de impresión.

Con el fin de verificar que la geometría de la construcción se ha realizado de forma correcta, tomaremos medidas de la pieza con un calibre (ver anexo de imágenes 6.2.4.1) y las compararemos con la geometría del diseño, para obtener datos de las posibles desviaciones que se puedan originar.

Ver Anexo de Imágenes 6.2.3

### **Acabados de la pieza.**

*Para realizar los siguientes trabajos deberemos hacer uso de unos guantes y unas gafas de protección, para prevenir posibles lesiones (Ver anexo de imágenes 6.2.5).*

Con la pieza verificada de forma correcta, se puede proceder a realizar los acabados finales necesarios.

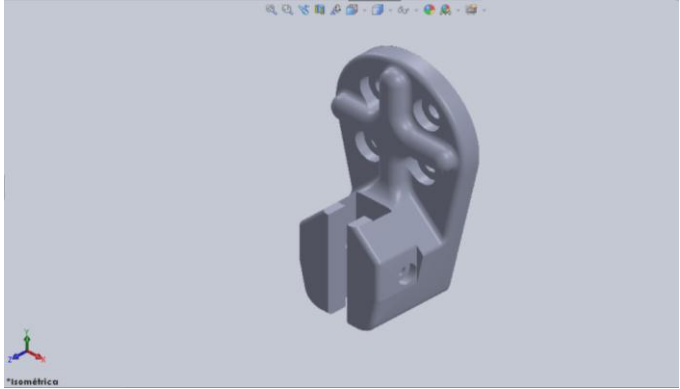
Si se quieren realizar insertos de algún elemento metálico, basta con calentar las piezas metálicas y colocarlas en el lugar asignado de la pieza.

Las superficies de la pieza pueden ser pulidas utilizando diferentes lijas (ver anexo de imágenes 6.2.4.2), para obtener acabados con mayor o menor rugosidad. Las superficies también se pueden imprimir, para facilitar así la adhesión de la pintura final.

### **Precio**

Para determinar el precio de una pieza, nos basaremos en una tabla que usa diferentes parámetros como: altura de la pieza, cantidad de material utilizado, tiempo de construcción y trabajos posteriores.

**Hoja de fabricación.**

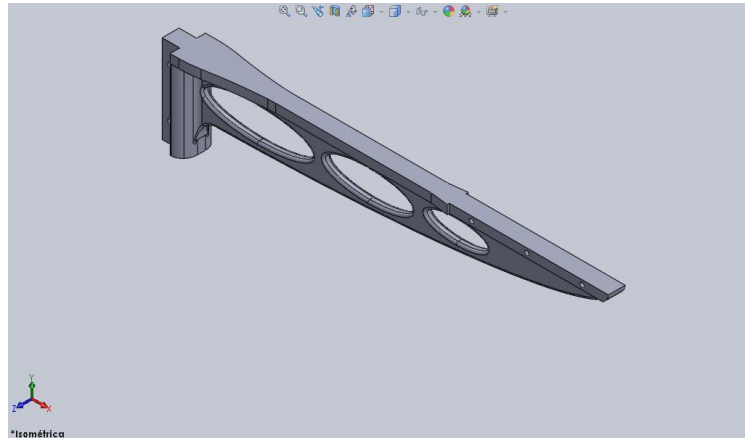
Nombre del archivo.	Soporte Motor
Imagen isométrica de la pieza.	
Dimensiones máximas (mm).	30*20*20
Material/Color.	PLA/2 piezas color negro- 2 piezas color naranja.
Espesor de capa.	0.25 mm
Capas perimetrales/porcentaje de relleno.	3 capas perimetrales/100% de relleno
Retirar soportes. SI/NO	SI
Acabados.	No
Tiempo de construcción.	58 minutos cada pieza.
Cantidad de material	3.4 metros – 11 gramos.

Ver anexo de planos (ver plano nº3) para más información.

**Hoja de fabricación.**

Nombre del archivo.  
Imagen isométrica de la pieza.

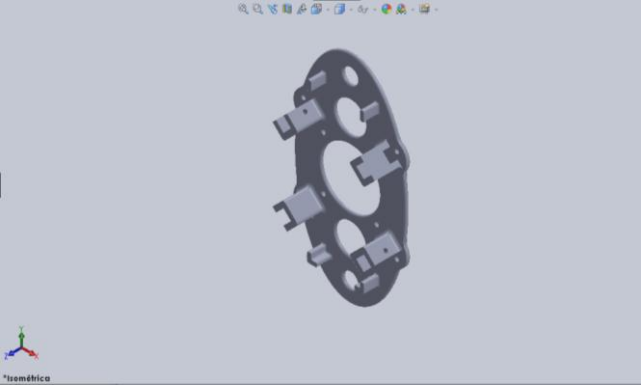
Brazo



Dimensiones máximas (mm).	230*28*45
Material/Color.	PLA/2 piezas color negro- 2 piezas color naranja.
Espesor de capa.	0.25 mm
Capas perimetrales/porcentaje de relleno.	3 capas perimetrales/100% de relleno
Retirar soportes. SI/NO	SI
Acabados.	Si
Tiempo de construcción.	2 horas 17 minutos cada pieza
Cantidad de material	8.54 metros-25 gramos

Ver anexo de planos (ver plano nº 4) para más información.

**Hoja de fabricación.**

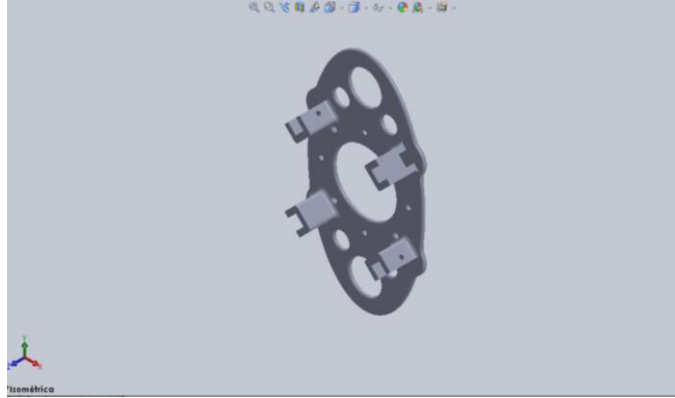
Nombre del archivo.	Cuerpo 1
Imagen isométrica de la pieza.	
Dimensiones máximas (mm).	200*100*25
Material/Color.	PLA/1 pieza color naranja
Espesor de capa.	0.25 mm
Capas perimetrales/porcentaje de relleno.	3 capas perimetrales/100% de relleno
Retirar soportes. SI/NO	SI
Acabados.	No
Tiempo de construcción.	3 horas 48 minutos
Cantidad de material	14 metros – 42 gramos.

Ver anexo de planos (ver plano nº5) para más información.

**Hoja de fabricación.**

Nombre del archivo.  
Imagen isométrica de la pieza.

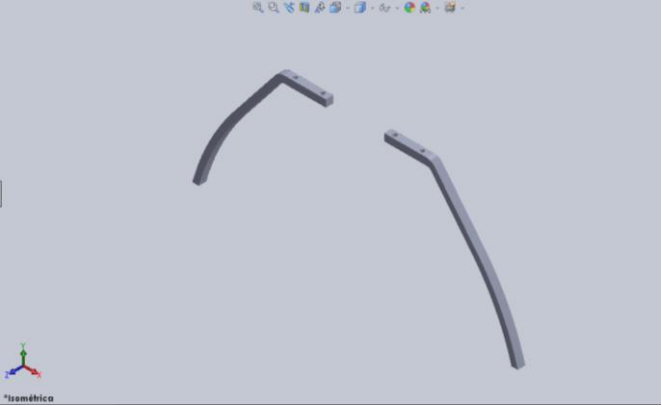
Cuerpo 2



Dimensiones máximas (mm).	230*28*45
Material/Color.	PLA/1 pieza color negro.
Espesor de capa.	0.25 mm
Capas perimetrales/porcentaje de relleno.	3 capas perimetrales/100% de relleno
Retirar soportes. SI/NO	SI
Acabados.	No
Tiempo de construcción.	3 horas 34 minutos cada pieza
Cantidad de material	13 metros-39 gramos

Ver anexo de planos (ver plano nº6) para más información.

**Hoja de fabricación.**

Nombre del archivo.	Patas
Imagen isométrica de la pieza.	
Dimensiones máximas (mm).	120*90*20
Material/Color.	PLA/2 piezas color blanco.
Espesor de capa.	0.25 mm
Capas perimetrales/porcentaje de relleno.	3 capas perimetrales/100% de relleno
Retirar soportes. SI/NO	SI
Acabados.	No
Tiempo de construcción.	1 hora 8 minutos cada pieza (2patas por pieza)
Cantidad de material	4.3 metros-13 gramos

Ver anexo de planos (ver plano nº7) para más información.

## CONCLUSIONES.

EVOLUCIÓN.



## **CONCLUSIONES**

La idea de desarrollar un cuadricóptero modular, nació como parte del desarrollo personal del autor del proyecto, en un continuo afán por conocer las nuevas tecnologías que han llegado al mercado en los últimos años y poner en práctica los conocimientos adquiridos en el grado de ingeniería mecánica.

El diseño desde cero, de una estructura ligera, resistente, capaz de alojar componentes electrónicos, que facilite un montaje/desmontaje sencillo y que se pueda fabricar con una impresora 3D comercial, ha resultado un trabajo complicado, que se ha podido concluir con éxito.

El cálculo de las piezas realizado, se ha orientado a la posible mejora de los diseños, de las diferentes piezas que componen el chasis-soporte del cuadricóptero; en concreto al brazo y al cuerpo central. Estos cálculos estáticos han permitido obtener geometrías complejas, que con la mayor ligereza posible, sean capaces de resistir los esfuerzos generados por los motores. Esta parte del proyecto se ha podido concluir con éxito.

El cálculo a impacto de las piezas, no se ha logrado concluir, por lo que no disponemos de información exacta para saber que fuerza de impacto sería necesaria para romper las piezas. Solo disponemos de los cálculos estáticos para realizar posibles hipótesis. Esto tampoco resulta problemático, debido a que la idea de desarrollar un chasis soporte de plástico, tiene como finalidad tener piezas de repuesto para realizar reparaciones si fuera necesario.

La fabricación con impresora 3D, del cuadricóptero modular ha concluido con éxito, ya que después de algunas pruebas, para poder obtener datos acerca de la precisión en la fabricación de piezas, se ha conseguido controlar las desviaciones, se han corregido las medidas originales de los diseños y se han obtenido unas medidas correctas en las piezas fabricadas.

La prueba de montaje de los componentes electrónicos ha concluido con éxito, al igual que la prueba de vuelo.

## **EVOLUCIÓN.**

Una posible evolución del proyecto, podría ser la creación de anclajes en el cuerpo central, permitiendo la colocación de una cámara para ayudar al pilotaje del cuadricóptero. Realizar el pilotaje gracias a unas gafas de realidad aumentada o bien realizar el pilotaje usando ordenador para controlar el recorrido en vuelo, mediante puntos GPS.

Otro posible desarrollo, sería motorizar y automatizar la modulación de la distancia entre motores, creando variaciones importantes en las geometrías diseñadas, lo que permitiría al cuadricóptero adaptarse a las condiciones ambientales. Aumentando o reduciendo en pleno vuelo la distancia entre motores, que permitiría modificar el tipo de vuelo.

La realización de cualquiera de las dos evoluciones, supondría un coste añadido importante. Esto se debe a la necesidad de incorporar controladoras programables. Estas controladoras permiten añadir más canales de acción sobre el cuadricóptero, pero a la vez exigen estaciones de radio control más complejas, lo que también incrementaría el precio.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

Se ha decidido separar la bibliografía en capítulos.

### **HISTORIA DE LOS DRONES**

\* Las imágenes 2.1.1 hasta la 2.1.7 han sido obtenidas de estas páginas web.

\* Consultadas los días 1/7/2016, 4/7/2016 y 5/7/2016.

- <http://drones.uv.es/origen-y-desarrollo-de-los-drones/>
- <http://www.aertecsolutions.com/2015/01/27/infografia-historia-de-los-sistemas-aereos-no-tripulados/>

### **CUADRICOPTEROS**

\* Las imágenes 2.2.1 hasta la 2.2.17 han sido obtenidas de estas páginas web.

\* Consultadas los días 5/7/2016, 6/7/2016 y 7/7/2016.

- <http://dronecenter.blogspot.com.es/p/construye-tu-drone.html>
- <http://www.aeromodelismovirtual.com/showthread.php?t=16383>,
- <http://www.lavanguardia.com/tecnologia/20160512/401754127216/bonadrone-mosquito-dron-modular-impresion-3d.html>
- <http://flynixie.com>
- <http://dronesbaratos.com>

### **NORMATIVA**

\* La información descrita en el capítulo de normativa ha sido obtenida de estas páginas web.

\* Consultada el día 5/7/2016.

- <http://www.dronespain.pro/nueva-ley-de-drones-en-espana-marzo-2016/>
- [http://www.seguridadaerea.gob.es/lang\\_castellano/noticias\\_revista/notic\\_anteriores/2015/recomendaciones\\_drones\\_act\\_ludicas.aspx](http://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/noticias_revista/notic_anteriores/2015/recomendaciones_drones_act_ludicas.aspx)

### **MECÁNICA DE VUELO**

\* Consultadas los días 5/7/2016, 6/7/2016 y 7/7/2016.

- <https://www.researchgate.net/publication/280938919>

La publicación 280938919, corresponde a la Tesis doctoral: Modelado matemático y control inteligente de un cuadricóptero. Eduardo Miguel Bucio Gallardo. México, D.F., mayo de 2015.

La información extraída de la presente, corresponde al capítulo: 1.3.4. Mecánica de vuelo de cuadricópteros.

Las imágenes 2.4.1, 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5 y 2.4.11 corresponden a dicho capítulo.

Otras páginas web de las que se ha obtenido información.

- [http://aero.us.es/AVE/archivos/Y0910/Tema5\\_partel.pdf](http://aero.us.es/AVE/archivos/Y0910/Tema5_partel.pdf)
- <http://cuadricoptero.org/funcionamiento-del-cuadricoptero/>
- <http://aerobotclubderoboticadeaeronuticos.blogspot.com.es/2012/01/introduccion-cuadricoptero.html>

## **COMPONENTES**

\* Las imágenes 2.6.1 hasta la 2.6.18 han sido obtenidas de estas páginas web.

\* Consultadas los días 5/7/2016, 6/7/2016 y 7/7/2016.

- <http://vueloartificial.com/introduccion/primeros-pasos/la-electronica-de-vuelo/>

### **MOTOR**

- <https://dronespersonalizados.blogspot.com.es/2013/11/motores-dc-brushless.html>

### **VARIADOR ESC**

- <http://www.rcextremo.co/producto/combo-motor-brushless-2212-13t-1000-kv-variador-esc-simonk-30a-2-helices-1045-cw-ccw/>

### **BATERÍAS**

- [http://aeromodelismo.epiel.com/c\\_baterias.html](http://aeromodelismo.epiel.com/c_baterias.html)

### **CONTROLADORA**

- <https://dronespersonalizados.blogspot.com.es>

### **AJUSTE VARIADOR VELOCIDAD**

- <http://www.multicopters.es/foro/vbulletin/showthread.php?7986-Metedura-de-pata-calibrando-esc-emax-30A-HELP-ME!>

## **IDEAS**

\* Las imágenes 2.7.1 hasta la 2.7.2 han sido obtenidas de estas páginas web.

\* Consultadas los días 20/7/2016, 21/7/2016 y 22/7/2016.

- <http://dronesdecarreras.com/chasis-fpv-250-fabricados-con-impresoras-3d/>
- <http://dronesdecarreras.com/lista-de-compra-microquad-fpv-120-150/#frames>

## **CÁLCULO**

\* La imagen 3.3.1 de las características del material ha sido obtenida de la siguiente página)

\* Consultadas los días 20/7/2016, 21/7/2016 y 22/7/2016.

- <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>

## **FABRICACIÓN 3D**

\* La imagen 3.4.1 e información histórica sobre la tecnología de fabricación FDM ha sido obtenida de las páginas.

\* Consultadas los días 20/7/2016, 21/7/2016 y 22/7/2016.

- <http://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>
- <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/06/abs.html>
- <https://kitprinter3d.com/es/blog/abs-o-pla-n23>

## AGRADECIMIENTOS

Quería agradecer a mi familia, pareja y amigos, todo el ánimo y apoyo que me han dado, para el desarrollo y la conclusión del presente proyecto.

También quería darle las gracias a mi tutor, que ha confiado en mi idea de proyecto desde el primer momento y me ha ayudado a desarrollarlo.

Por último, agradecer a los compañeros, que he tenido durante mi periodo de prácticas en la Fundación AITIIP, los consejos que me han dado en momentos de dudas y el permiso por parte de la fundación para hacer uso de sus instalaciones.

## **ANEXOS.**

1. TABLAS.
2. IMÁGENES
3. PRESUPUESTOS
4. PLANOS.



## **6.1 TABLAS**

TABLA 1: Cálculos de las fuerzas generadas por los motores.

TABLA 2: Información de las desviaciones en la fabricación.

TABLA 3: Pesos

TABLA 1: CÁLCULOS DE LAS FUERZAS GENERADAS POR LOS MOTORES.

Movimiento en $\Phi$ y en $\theta$			
Gravedad	$g=$	9,81	(M/S <sup>2</sup> )
Masa	$M=$	0,85	(kg)
Longitud del brazo	$l=$	0,23	(m)
Momento de inercia de los ejes X e Y	$I_L=$	$4,856 \times 10^{-3}$	(kg*m <sup>2</sup> )
Momento de inercia en el eje Z	$I_Z=$	$8,801 \times 10^{-3}$	(kg*m <sup>2</sup> )
Constante de arrastre de torque	$b=$	$1,140 \times 10^{-7}$	(kg * m <sup>2</sup> /rev <sup>2</sup> )
Constante de arrastre del aire para el eje X	$B_x=$	0,25	(kg/s)
Constante de arrastre del aire para el eje Y	$B_y=$	0,25	(kg/s)
Constante de arrastre del aire para el eje Z	$B_z=$	0,25	(kg/s)
Constante de arrastre del aire para $\Phi$	$B_\Phi=$	0,01	(kg*m <sup>2</sup> /s)
Constante de arrastre del aire para $\theta$	$B_\theta=$	0,01	(kg*m <sup>2</sup> /s)
Constante de arrastre del aire para $\Psi$	$B_\Psi=$	$5 \times 10^{-3}$	(kg*m <sup>2</sup> /s)
Velocidad media desplazamiento en X	$V_x=$	2	(m/s)
Velocidad media desplazamiento en Y	$V_y=$	2	(m/s)
Velocidad media desplazamiento en Z	$V_z=$	1	(m/s)
Momento de inercia de cada rotor	$I_M=$	$3,357 \times 10^{-5}$	(kg*m <sup>2</sup> )
Revoluciones motor	$w=$	250	(rpm)
Constante sustentación hélice	$k=$	0,0002	(kg * m/rev <sup>2</sup> )
Fuerza de sustentación conservativa (Propulsión hélice)	$F_s=$	12,5	(N)

$T_{1,\theta}=$	2,033 (N*m)	$T_{1,\Phi}=$	2,033 (N*m)
$T_{2,\theta}=$	2,033 (N*m)	$T_{2,\Phi}=$	-2,033 (N*m)
$T_{3,\theta}=$	-2,033 (N*m)	$T_{3,\Phi}=$	-2,033 (N*m)
$T_{4,\theta}=$	-2,033 (N*m)	$T_{4,\Phi}=$	2,033 (N*m)
Rotación en el eje X( $\Phi$ )		Rotación en el eje Y( $\theta$ )	

## Fuerza de sustentación no conservativa (Fricción del aire)

Fuerza de sustentación en el eje X( $\Phi$ )	$F_x(0^\circ)=$	0	(N)
	$F_x(1^\circ)=$	0,209397	(N)
	$F_x(2^\circ)=$	0,41854	(N)
	$F_x(5^\circ)=$	1,041891	(N)
Fuerza de sustentación en el eje Y( $\theta$ )	$F_y(0^\circ)=$	0	(N)
	$F_y(1^\circ)=$	-0,20943	(N)
	$F_y(2^\circ)=$	-0,41879	(N)
	$F_y(5^\circ)=$	-1,04587	(N)
Fuerza de sustentación en el eje Z( $\Psi$ )	$F_z(0^\circ)=$	7,345	(N)

Las ecuaciones empleadas, para el cálculo de las fuerzas, que se reflejan en la tabla corresponden al capítulo referenciado que corresponde a la Tesis doctoral: Modelado matemático y control inteligente de un cuadricóptero. Eduardo Miguel Bucio Gallardo. México, D.F., mayo de 2015.

Las fuerzas de sustentación no conservativas, debido a la fricción del aire, se han despreciado a la hora de realizar los cálculos estáticos del chasis-soporte, teniendo en cuenta únicamente, la fuerza de sustentación conservativa.

TABLA 2: INFORMACIÓN DE LAS DESVIACIONES EN LA FABRICACIÓN.

Desviaciones entre las medidas del diseño y las medidas reales.									
Piezas	Medidas diseño			Medidas reales			Desviaciones		
<b>Soporte Motor</b>	Alojamiento guía			Alojamiento guía			Alojamiento guía		
	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY
	8			7,8			0,2		
	4			3,6			0,4		
	2			2,1			0,1		
		5,2			5,4			0,2	
		4			4,4			0,4	
	Taladros anclaje motor			Taladros anclaje motor			Taladros anclaje motor		
	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY
			6,3			5,3			0,5
			3			2,4			0,3
<b>Brazo</b>	Guiá Soporte			Guiá Soporte			Guiá Soporte		
	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY
	8			8,5			0,5		
	4			4,8			0,8		
			5			5,2			0,2
	Unión brazo-cuerpo central			Unión brazo-cuerpo central			Unión brazo-cuerpo central		
	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY	Dirección X	Dirección Y	Dirección XY
	3			3,7			0,7		
	9			8,35			0,65		
	3			3,7			0,7		
		3			3,4			0,4	
		5			4,4			0,6	
Valores de corrección aplicados para la 2ª impresión.							0,50625	0,36	0,4

Las desviaciones que se han tenido en cuenta, para realizar esta tabla, corresponden a las partes del brazo y del soporte motor, que están en contacto entre ellas.

Se han elegido estas partes, por tener gran importancia de cara al funcionamiento del sistema modular.

Los valores de corrección obtenidos corresponden a la toma de medidas realizadas sobre una primera prueba de fabricación (Ver Anexo de Imágenes 6.2.3)

TABLA 3: PESOS.

PESOS			
Componentes electronicos	Uds.	Peso(gr)	Peso Total(gr)
Motor	4	49	196
Variador	4	25	100
Controladora	1	32	32
Placa distribución	1	20	20
Batería	1	244	244
Cableado	1	10	10
			<b>602</b>
Piezas chasis-soporte	Uds.	Peso(gr)	Peso Total(gr)
Soporte motor	4	11	44
Brazo	4	25	100
Cuerpo inferior	1	42	42
Cuerpo superior	1	39	39
Pata	4	6,5	26
			<b>251</b>
<b>PESO TOTAL DEL DRON</b>			<b>853</b>

## **6.2 IMÁGENES.**

6.2.1 PIEZAS FABRICADAS, SIN LIMPIAR

6.2.2 PIEZAS FABRICADAS Y SIN SOPORTES.

6.2.3 INSPECCIÓN DE PIEZAS FABRICADAS.

6.2.4 HERRAMIENTAS DE MEDIDA, LIMPIEZA Y ACABADOS.

6.2.5 ELEMENTOS DE PROTECCIÓN.

### 6.2.1 PIEZAS FABRICADAS, SIN LIMPIAR



Imagen 6.2.1.1

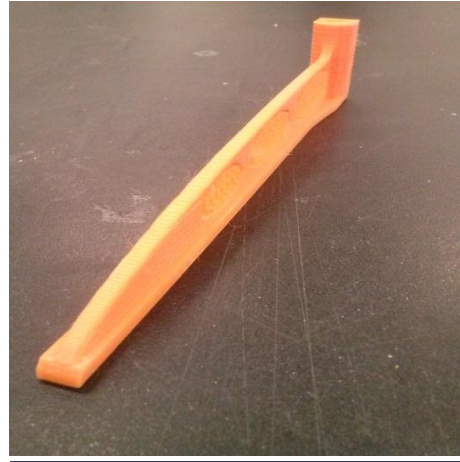


Imagen 6.2.1.2



Imagen 6.2.1.3



Imagen 6.2.1.4

Las piezas que se ven en las imágenes corresponden al segundo diseño del brazo (Imagen 6.2.1.1 y Imagen 6.2.1.2) y del soporte del motor (Imagen 6.2.1.3 y Imagen 6.2.1.4) sin la última modificación.

En las imágenes se pueden ver como salen las piezas de la máquina, se pueden ver los soportes que se usan para completar la fabricación de forma óptima.

### 6.2.2 PIEZAS FABRICADAS Y SIN SOPORTES.



Imagen 6.2.2.1



Imagen 6.2.2.2



Imagen 6.2.2.3



Imagen 6.2.2.4

Las piezas que se ven en las imágenes corresponden al brazo (Imagen 6.2.2.1 y Imagen 6.2.2.2) y al soporte del motor (Imagen 6.2.2.3 y Imagen 6.2.2.4).

En las imágenes se pueden ver las piezas, sin los soportes y con los acabados necesarios.

### 6.2.3 INSPECCIÓN DE PIEZAS FABRICADAS.



Imagen 6.2.3.1



Imagen 6.2.3.2



Imagen 6.2.3.3



Imagen 6.2.3.4

La parte de la pieza que se ve en la imagen 6.2.3.1 corresponde a la unión del brazo con el cuerpo; y la parte de la pieza que se ve en la imagen 6.2.3.2 corresponde a la unión del cuerpo con el brazo.

La parte de la pieza que se ve en la imagen 6.2.3.3 corresponde a la unión del brazo con el soporte del motor; y la parte de la pieza que se ve en la imagen 6.2.3.4 corresponde a la unión del soporte del motor con el brazo.



#### 6.2.4 HERRAMIENTAS DE MEDIDA, LIMPIEZA Y ACABADOS.



Imagen 6.2.4.1



Imagen 6.2.4.2

En la imagen 6.2.4.1, podemos ver un calibre de precisión, que muestra las mediciones digitalmente.

En la imagen 6.2.4.2, podemos ver alicates, alicates de corte, cutter, lija de grano 80 y lija de grano 60.

#### 6.2.5 ELEMENTOS DE PROTECCIÓN.



Imagen 6.2.5.1

En la imagen 6.2.5.1, podemos ver unos guantes de protección y unas gafas de seguridad.

## **6.3 PRESUPUESTOS.**

6.3.1 PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN.

6.3.2 PRESUPUESTO DE COMPRA.

6.3.3 PRESUPUESTO FINAL.

## PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN.

PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN.			
MATERIAL			
Material	Coste	Densidad	
PLA	20 €/kg	1,25 gr/cm3	
Cantidad de material empleado (kg):		0,5 kg	
<b>Coste del nuevo material:</b>			<b>10,00 €</b>
TRABAJO DE MÁQUINA			
Tiempo preparación máquina:		1 h	
Tiempo extracción y limpieza pieza:		2 h	
Tiempo total de construcción:		25 h	
Coste Operario		20 €/h	60,00 €
Coste operación máquina (Energía):		0,417703413 €/h	10,44 €
<b>Coste total máquina:</b>			<b>70,44 €</b>
AMORTIZACIONES			
Máquina		0,23 €/h	5,76 €
<b>Coste total amortizaciones:</b>			<b>5,76 €</b>
ACABADOS			
Lijas, Pintura, Pegamentos...			5,00 €
Horas operario		2 h	
Coste operario		20 €/h	40,00 €
<b>Coste acabados:</b>			<b>45,00 €</b>
Suma de costes			131,19 €
<b>COSTE FINAL</b>		Beneficio	15,00% 150,87 €

## PRESUPUESTO DE COMPRA.

PRESUPUESTO DE COMPRA				
COMPONENTES ELECTRÓNICOS				
Componente	Coste unidad	Nº Unidades	Coste Total	
Motor GWS 2212/13T	15 €/Ud	4	60	
Variador de velocidad (ESC) Simonk 30A	8 €/Ud	4	32	
Batería Multistar 4000	18 €/Ud	2	36	
Controladora KK2.1.5	18 €/Ud	1	18	
Placa distribución energía	3,5 €/Ud	1	3,5	
Radio control Flysky FS-T6	50 €/Ud	1	50	
<b>Coste de los componentes:</b>			<b>199,50 €</b>	
<b>COSTE FINAL</b>		IVA	21,00%	<b>241,40 €</b>

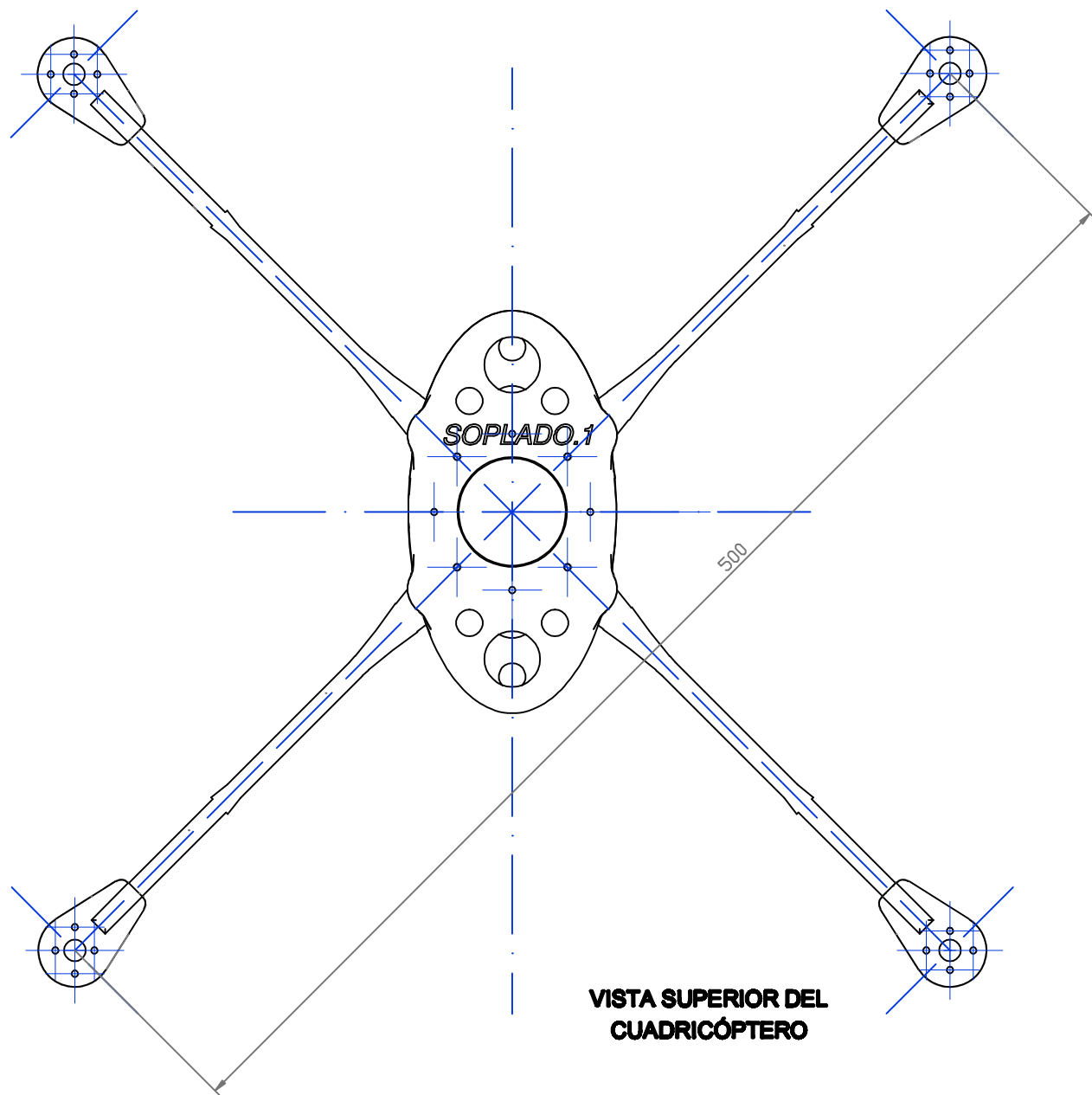
## PRESUPUESTO FINAL

<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	
PRESUPUESTO DE FABRICACIÓN.	
<b>COSTE FINAL</b>	150,87 €
PRESUPUESTO DE COMPRA.	
<b>COSTE FINAL</b>	241,40 €
<b>COSTE FINAL DEL PROYECTO</b>	392,27 €

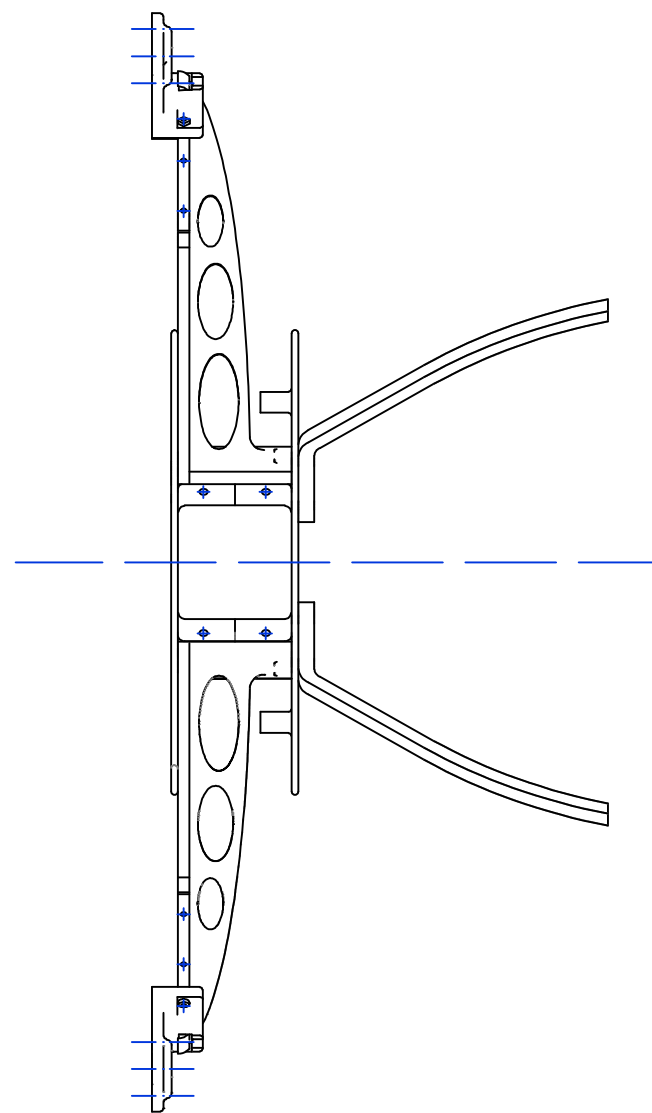
## **PLANOS.**

1. VISTAS CUADRICOPTERO.
2. EXPLOSIÓN CONJUNTO.
3. SOPORTE MOTOR.
4. BRAZO.
5. CUERPO INFERIOR.
6. CUERPO SUPERIOR.
7. PATAS.
8. POSICIONADO.
9. COMPONENTES ELECTRÓNICOS

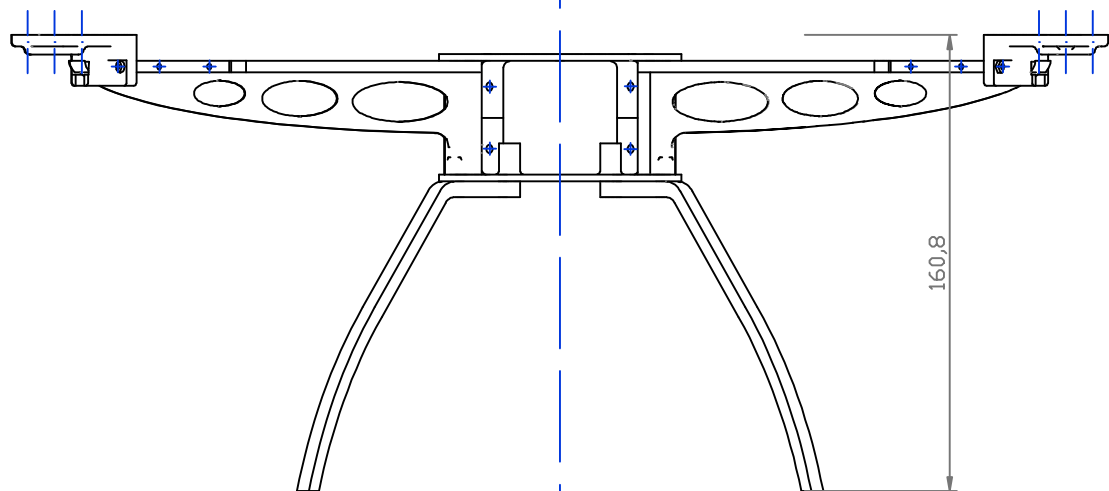




VISTA SUPERIOR DEL CUADRICÓPTERO



VISTA LATERAL DEL CUADRICÓPTERO



VISTA FRONTAL DEL CUADRICÓPTERO

POSICIONADO DE TODAS LAS PIEZAS QUE COMPONEN EL CHASIS-SOPORTE DEL CUADRICÓPTERO, CON LOS SOPORTES DE LOS MOTORES EN LA POSICIÓN MAS ABIERTA

	<i>Fecha</i>	<i>Nombre</i>	<i>Firma:</i>		Escuela de Ingeniería y Arquitectura <b>Universidad Zaragoza</b>
	<i>Dibujado</i>	15/11/2016			
	<i>Comprobado</i>	18/11/2016	Juan Peña	<i>Nº Alumno</i>	535232
<i>Escala</i>	1:2	<i>Título</i>	<b>VISTAS CUADRICÓPTERO</b>		
		<i>Curso</i>	2015-2016		
		<i>Plano Nº</i>	1		

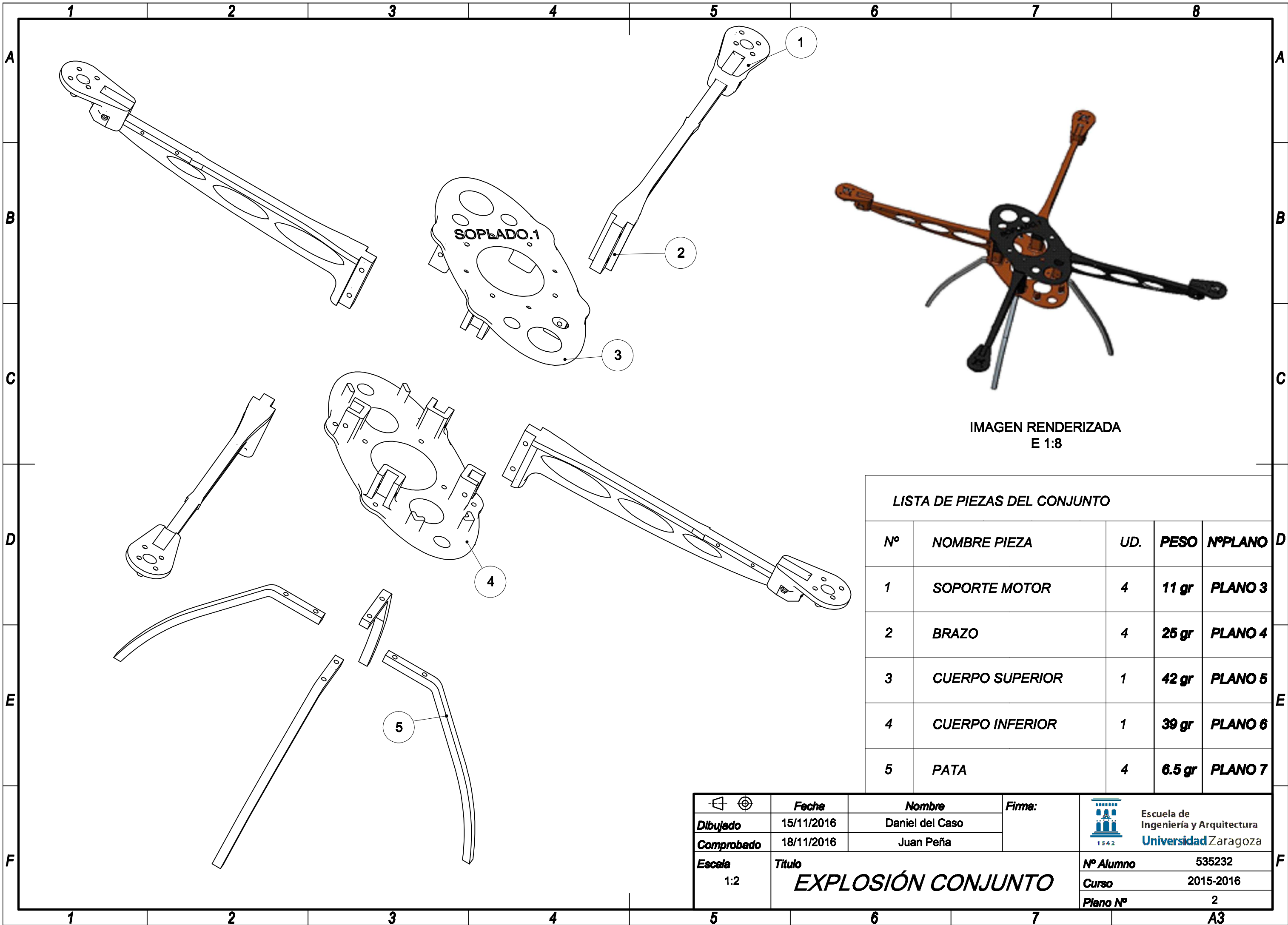


IMAGEN RENDERIZADA  
E 1:8

LISTA DE PIEZAS DEL CONJUNTO				
Nº	NOMBRE PIEZA	UD.	PESO	NºPLANO
1	SOPORTE MOTOR	4	11 gr	PLANO 3
2	BRAZO	4	25 gr	PLANO 4
3	CUERPO SUPERIOR	1	42 gr	PLANO 5
4	CUERPO INFERIOR	1	39 gr	PLANO 6
5	PATA	4	6.5 gr	PLANO 7

	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Firma:</b>	Escuela de Ingeniería y Arquitectura <b>Universidad Zaragoza</b>	
	<i>Dibujado</i>	15/11/2016			Daniel del Caso
<i>Comprobado</i>	18/11/2016	Juan Peña	<b>Nº Alumno</b>		535232
<b>Escala</b>	1:2	<b>Título</b>	<b>Curso</b>		2015-2016
		<b>EXPLOSIÓN CONJUNTO</b>	<b>Plano Nº</b>	2	



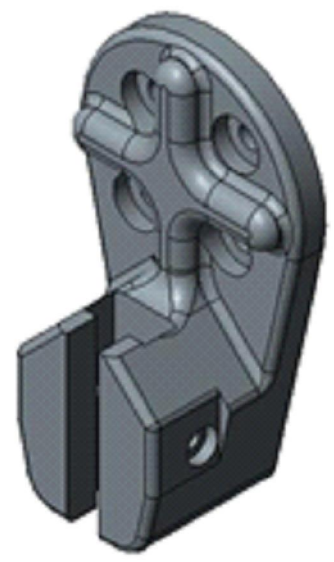
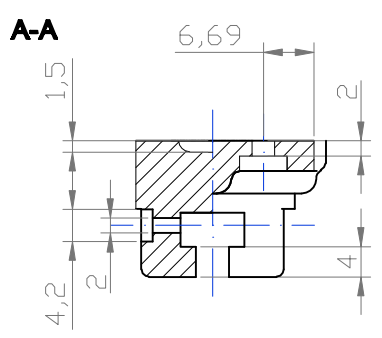
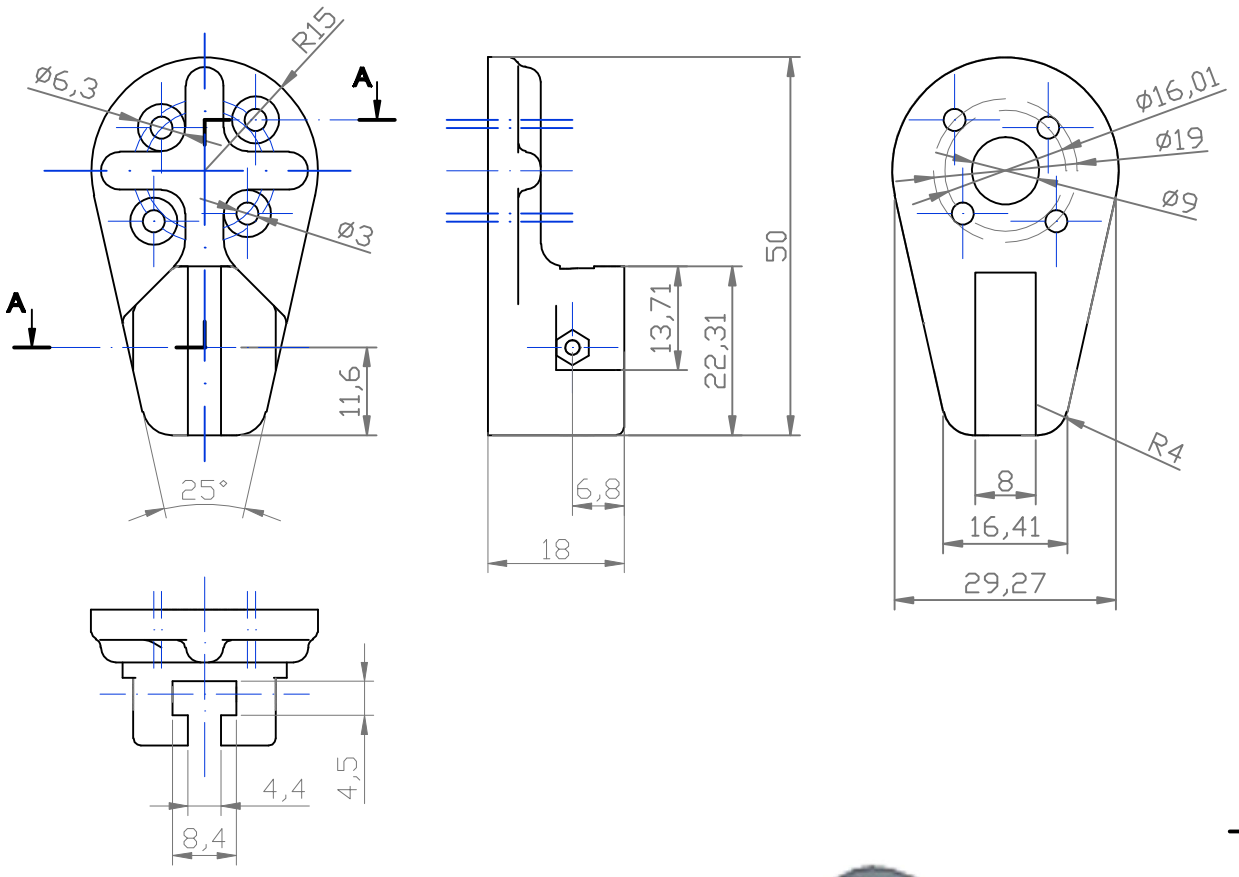
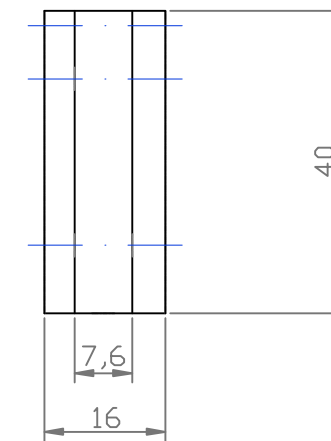
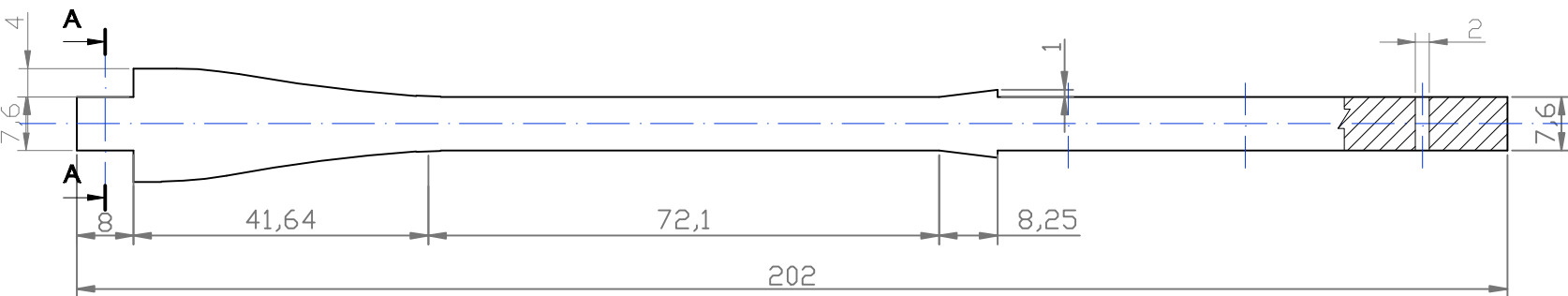
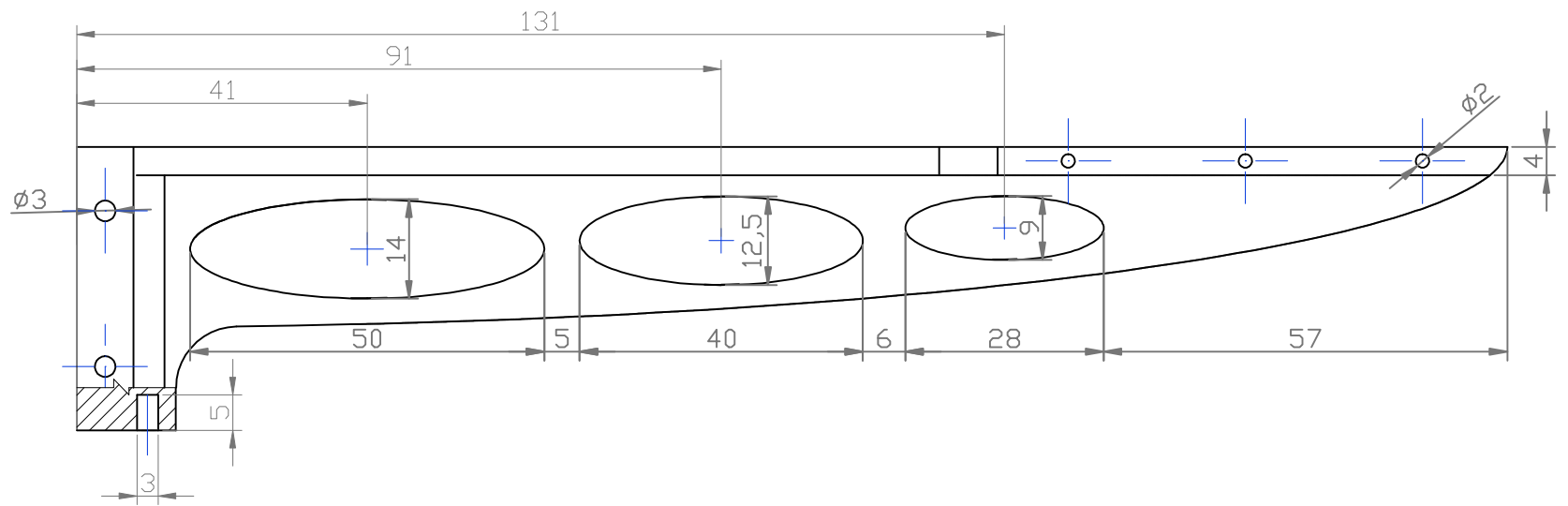
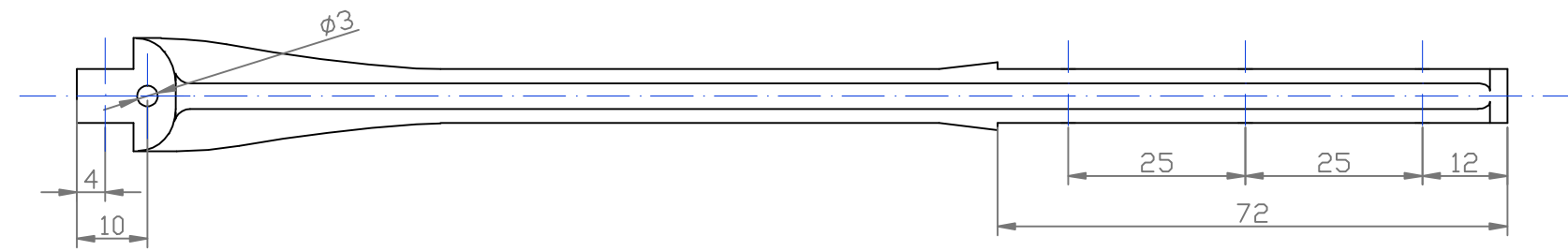


IMAGEN RENDERIZADA.  
E 2:1

	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Firma:</b>		Escuela de Ingeniería y Arquitectura <b>Universidad Zaragoza</b>
	<b>Dibujado</b>	15/11/2016			
	<b>Comprobado</b>	18/11/2016	Juan Peña		
<b>Escala</b> 1:1	<b>Título</b> <h1>SOPORTE MOTOR</h1>	<b>Nº Alumno</b>		535232	
		<b>Curso</b>		2015-2016	
		<b>Plano Nº</b>		3	



A-A

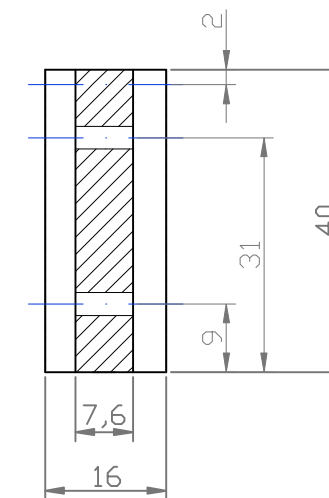
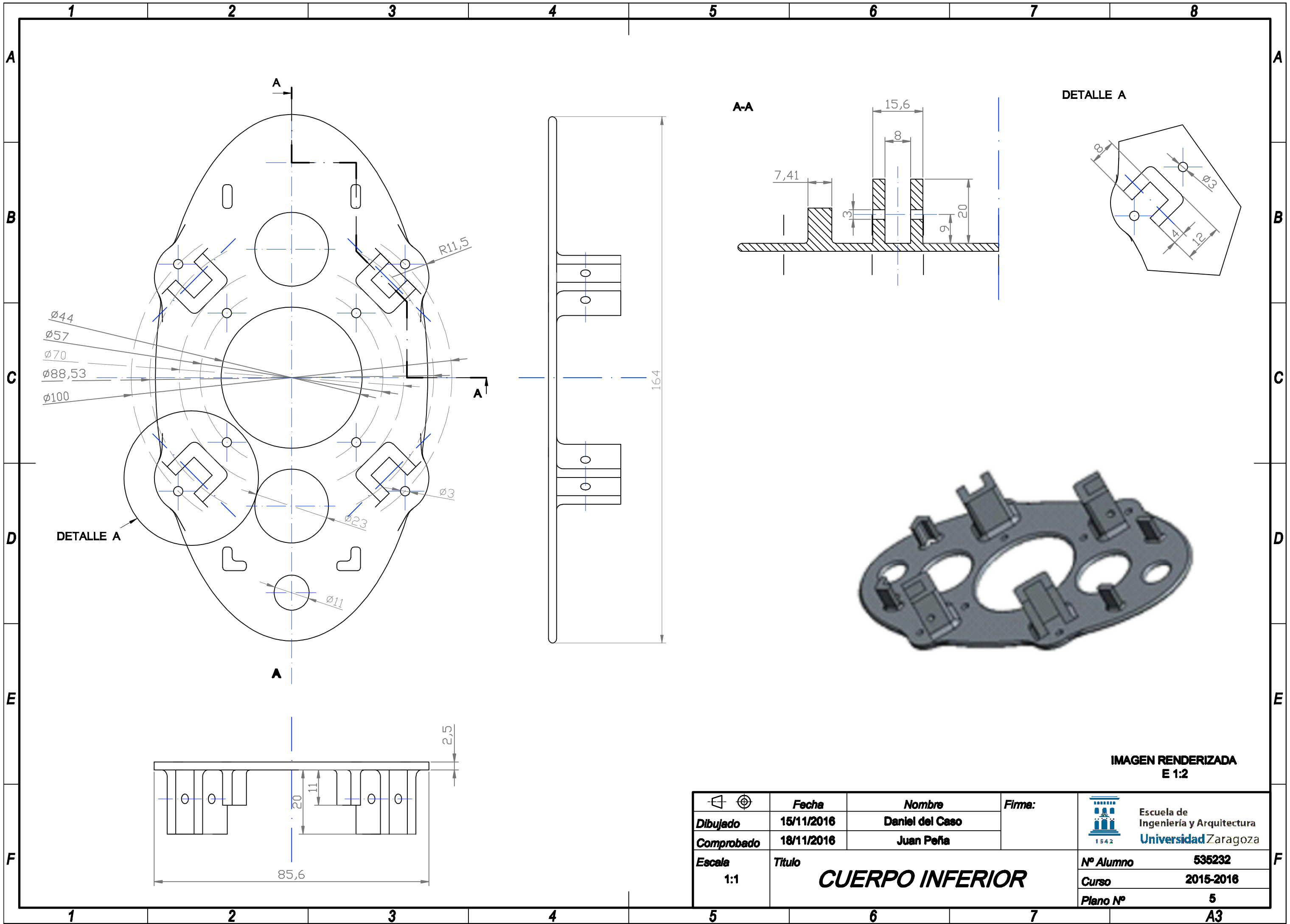


IMAGEN RENDERIZADA  
E 1:4

	<b>Fecha</b> 15/11/2016	<b>Nombre</b> Daniel del Caso	<b>Firma:</b>		<b>Nº Alumno</b> 535232
<b>Dibujado</b>	<b>Comprobado</b> 18/11/2016	<b>Juan Peña</b>			<b>Curso</b> 2015-2016
<b>Escala</b> 1:1	<b>Título</b> <b>BRAZO</b>			<b>Plano Nº</b> 4	<b>A3</b>



	<i>Fecha</i>	<i>Nombre</i>	<i>Firma:</i>	 Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza
	<i>Dibujado</i>	15/11/2016		
	<i>Comprobado</i>	18/11/2016	Juan Peña	<i>Nº Alumno</i> 535232
<i>Escala</i>	1:1	<i>Título</i>		<i>Curso</i> 2015-2016
		<b>CUERPO INFERIOR</b>		<i>Plano Nº</i> 5

IMAGEN RENDERIZADA  
E 1:2

F

E

D

C

B

A

F

E

D

C

B

A

1

2

3

4

5

6

7

A3

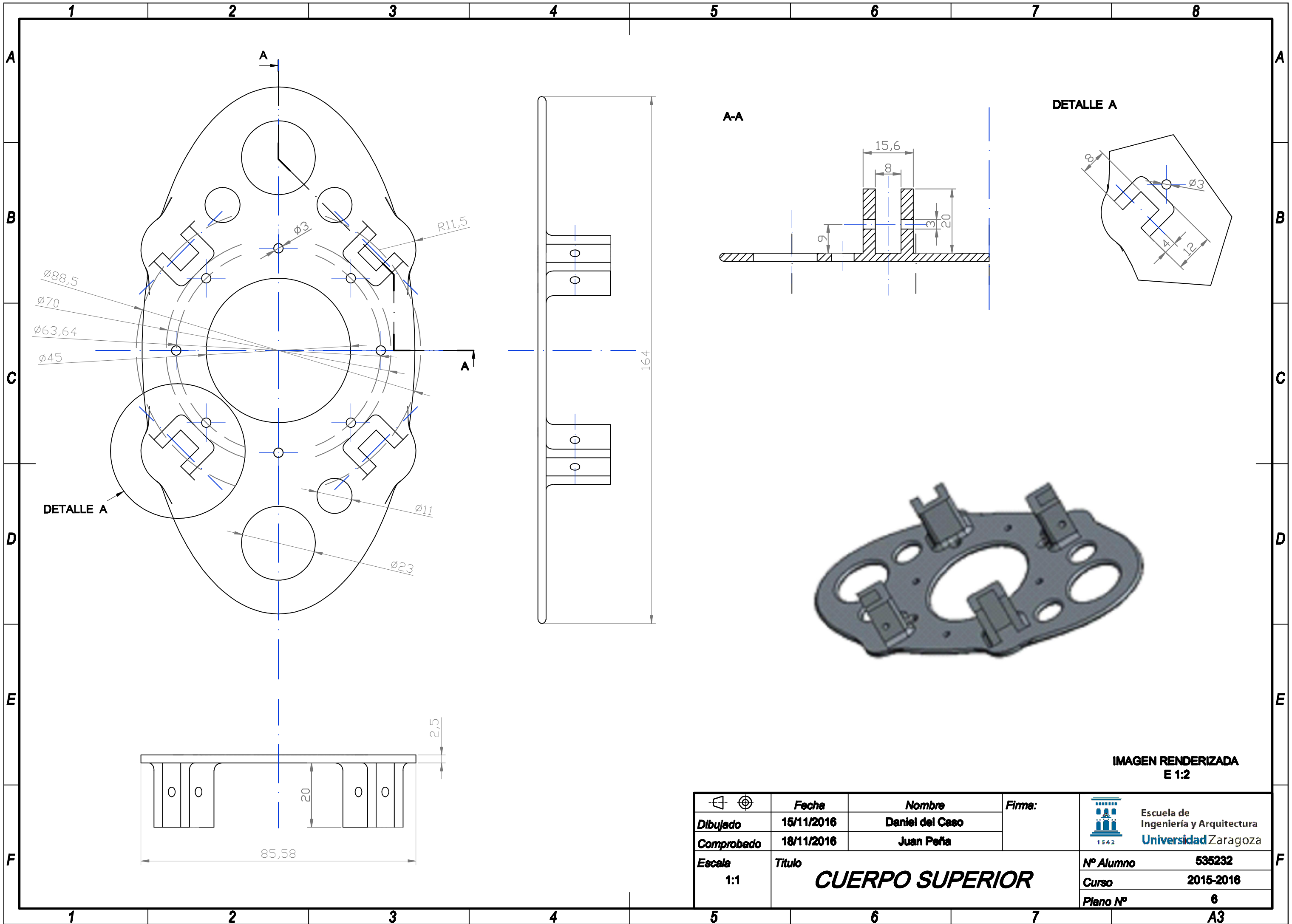
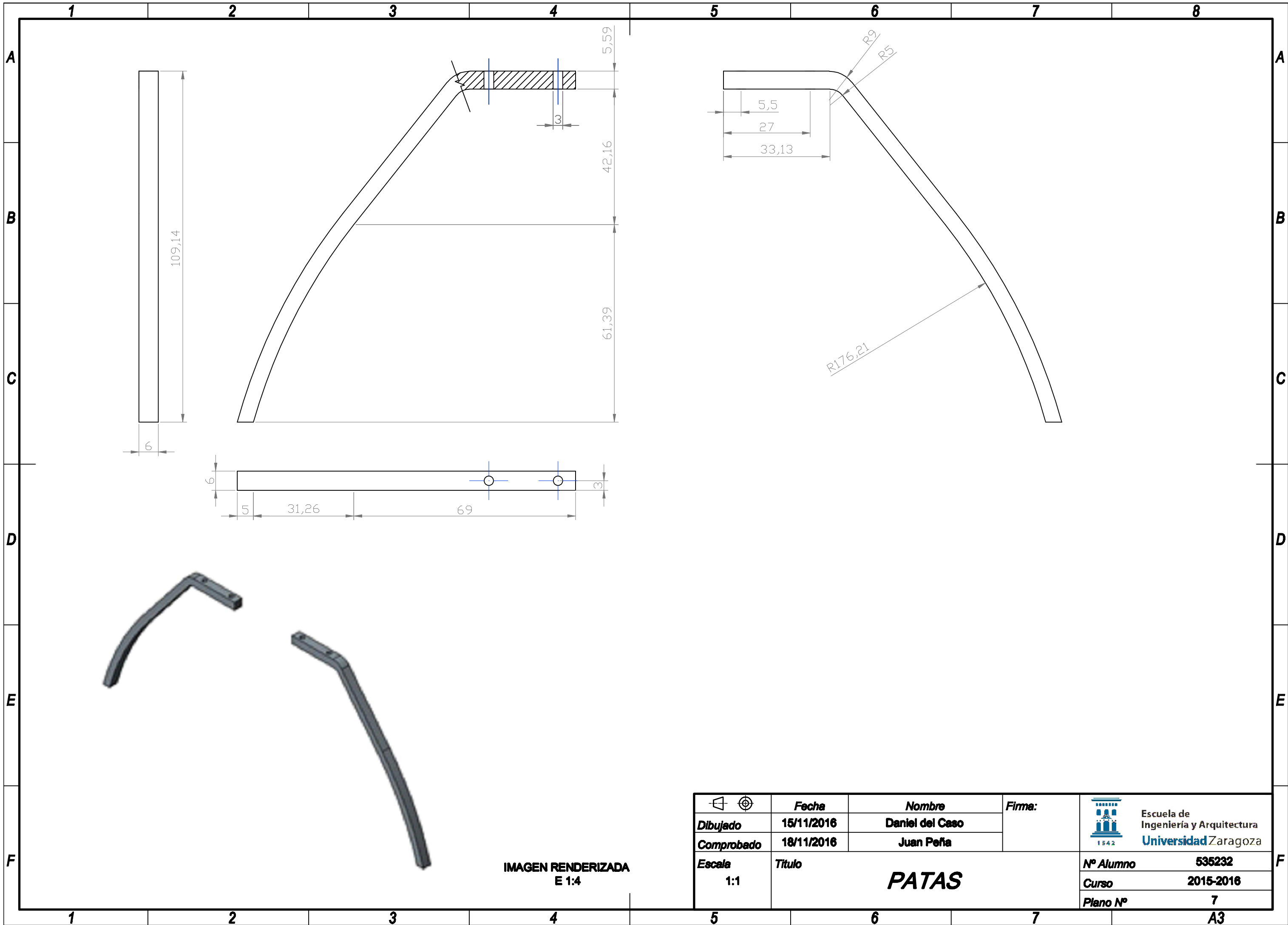


IMAGEN RENDERIZADA  
E 1:2

	<i>Fecha</i>	<i>Nombre</i>	<i>Firma:</i>		Escuela de Ingeniería y Arquitectura <b>Universidad Zaragoza</b>
	<i>Dibujado</i>	15/11/2016			
	<i>Comprobado</i>	18/11/2016	Juan Peña	<i>Nº Alumno</i>	535232
<i>Escala</i>	1:1	<i>Título</i>		<i>Curso</i>	2015-2016
		<b>CUERPO SUPERIOR</b>		<i>Plano Nº</i>	6



	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Firma:</b>	
	<b>Dibujado</b>	15/11/2016		
	<b>Comprobado</b>	18/11/2016	Juan Peña	<b>Nº Alumno</b>
<b>Escala</b>	1:1	<b>Título</b>		535232
		<b>PATAS</b>		<b>Curso</b>
				2015-2016
				<b>Plano Nº</b>
				7

IMAGEN RENDERIZADA  
E 1:4

F

A3

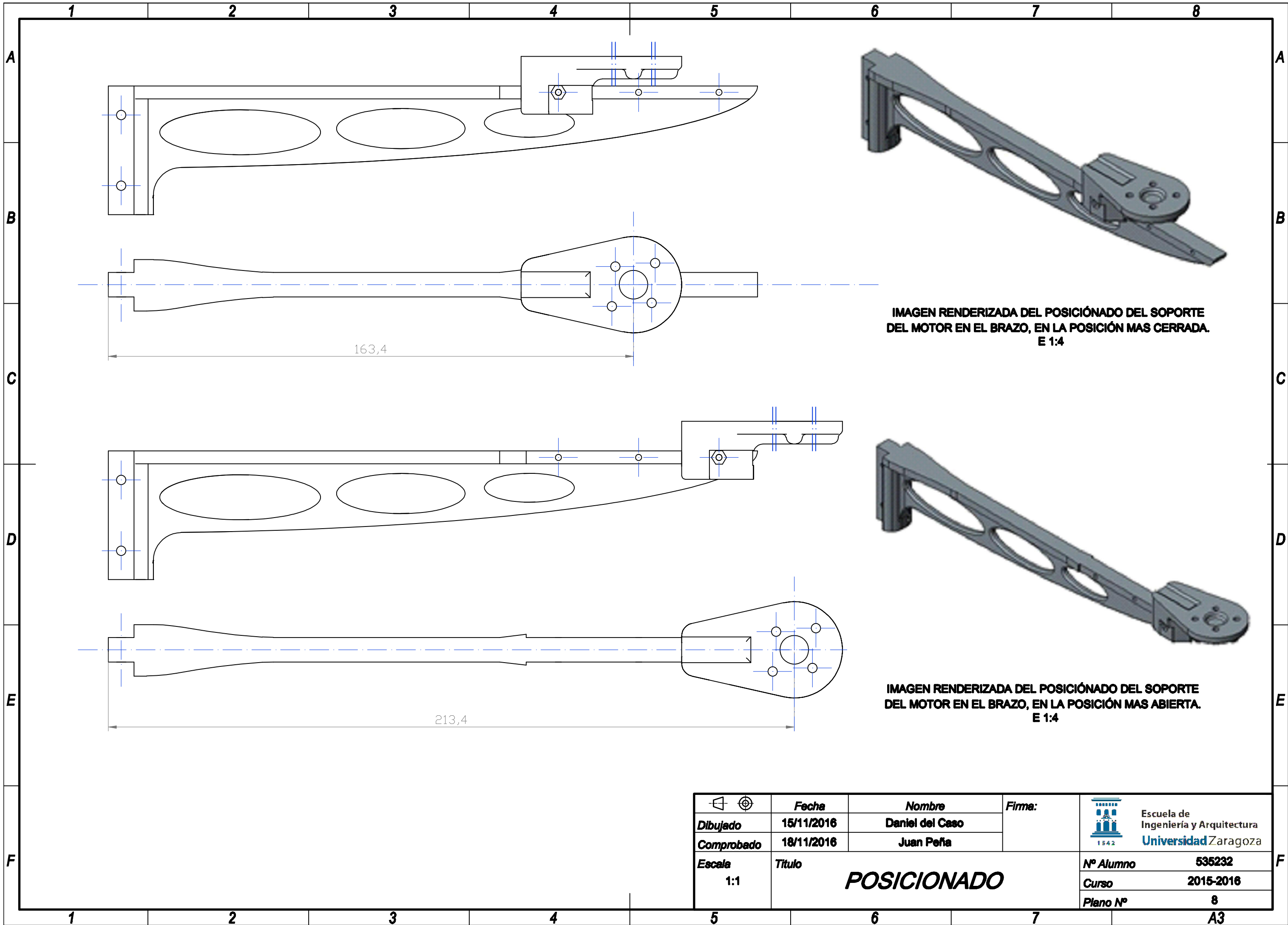
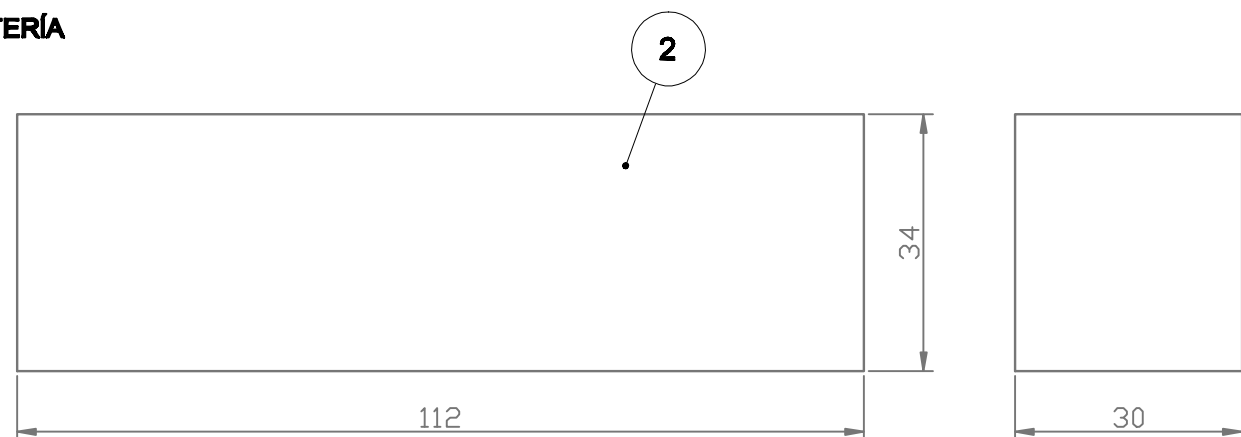


IMAGEN RENDERIZADA DEL POSICIONADO DEL SOPORTE DEL MOTOR EN EL BRAZO, EN LA POSICIÓN MAS CERRADA. E 1:4

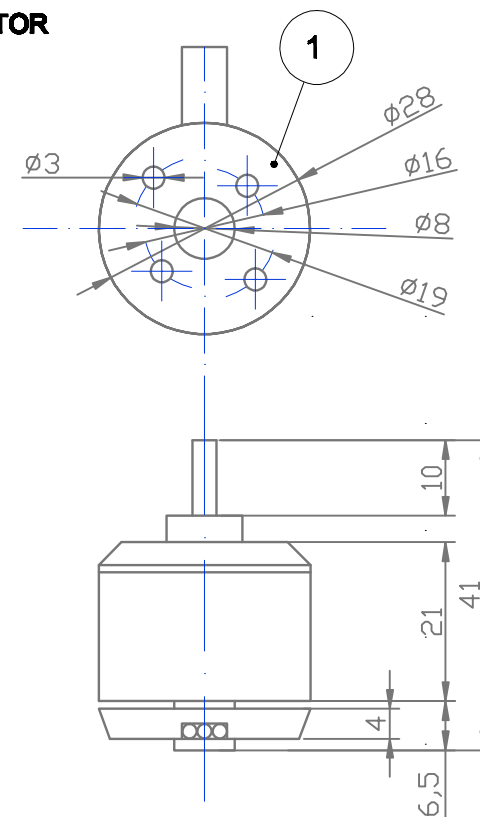
IMAGEN RENDERIZADA DEL POSICIONADO DEL SOPORTE DEL MOTOR EN EL BRAZO, EN LA POSICIÓN MAS ABIERTA. E 1:4

	<i>Fecha</i>	<i>Nombre</i>	<i>Firma:</i>		Escuela de Ingeniería y Arquitectura <b>Universidad Zaragoza</b>
	<i>Dibujado</i>	15/11/2016			
	<i>Comprobado</i>	18/11/2016	Juan Peña	<i>Nº Alumno</i>	535232
<i>Escala</i>	1:1	<i>Título</i>		<i>Curso</i>	2015-2016
		<b>POSICIONADO</b>		<i>Plano Nº</i>	8

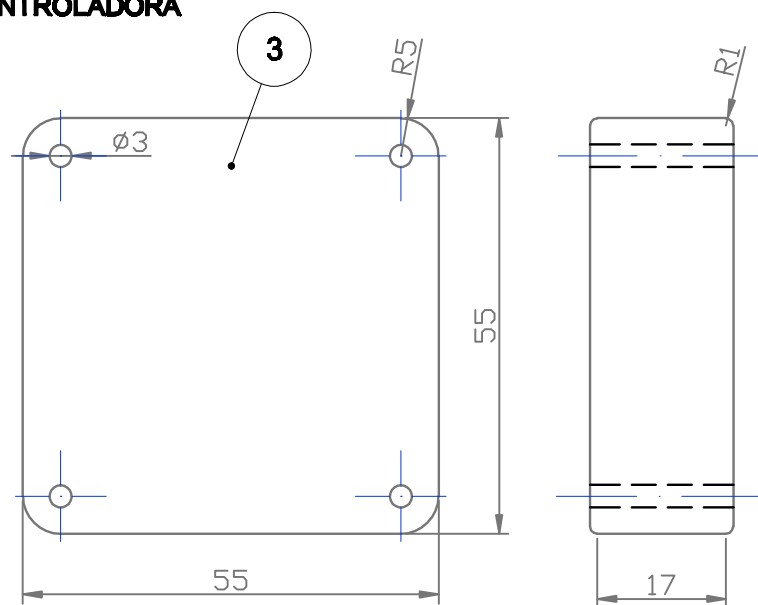
BATERÍA



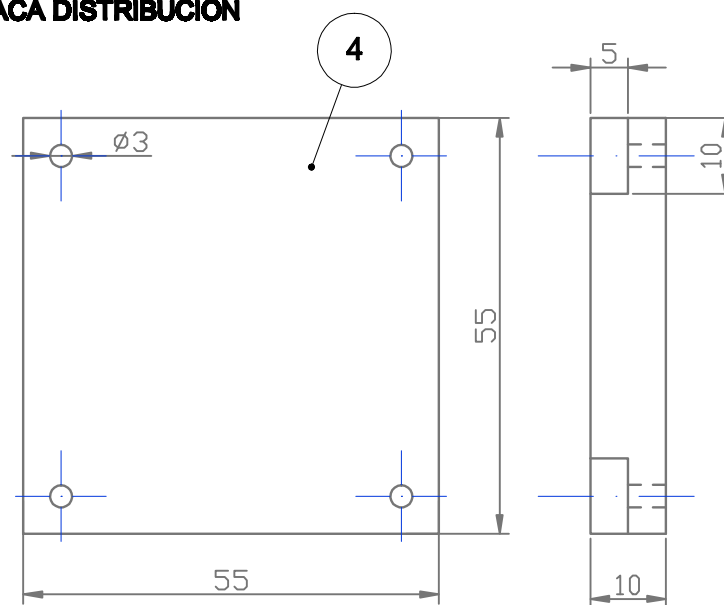
MOTOR



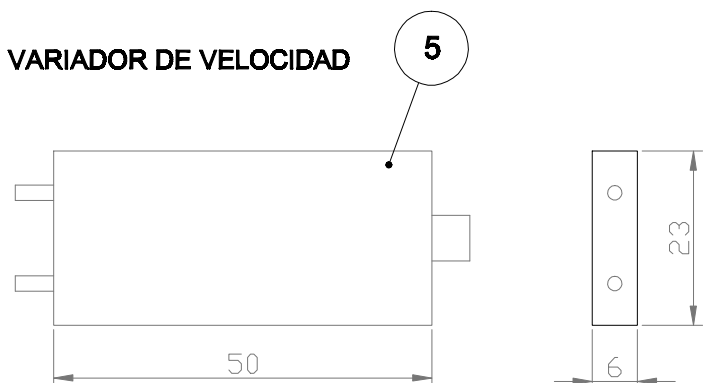
CONTROLADORA



PLACA DISTRIBUCIÓN



VARIADOR DE VELOCIDAD



LISTA DE PIEZAS DE COMPONENTES

Nº	NOMBRE PIEZA	UD.	PESO
1	MOTOR	4	49 gr
2	BATERÍA	1	244 gr
3	CONTROLADORA	1	32 gr
4	PLACA DISTRIBUCIÓN	1	20 gr
5	VARIADOR VELOCIDAD	4	25 gr

	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Firma:</b>	 Escuela de Ingeniería y Arquitectura <b>Universidad Zaragoza</b>	
	<b>Dibujado</b>	15/11/2016			Daniel del Caso
<b>Comprobado</b>	18/11/2016	Juan Peña	<b>Nº Alumno</b>		535232
<b>Escala</b>	1:1	<b>Título</b>	<b>Curso</b>		2015-2016
		<b>COMPONENTES ELECTRÓNICOS</b>		<b>Plano Nº</b>	9