



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Trabajo Final de Grado

Diseño de Base Giroscópica para el Análisis de Control de la Actitud de Cuadricópteros

MEMORIA

Autor:

Alberto Javier Pemán Hernández

Director:

Sergio García-Nieto Rodríguez

Valencia, a 6 de julio de 2017

*A mi familia, sin su apoyo
este sueño no habría sido posible.*

Resumen

El crecimiento del mercado de cuatrirotores (o cuadricópteros) a lo largo de los últimos años ha provocado un aumento de la necesidad de sistemas de control para los mismos debido a la gran cantidad de usos que tienen. La evaluación de los nuevos sistemas de control no es sencilla ya que normalmente requiere pruebas de vuelo. A continuación se presenta un sistema que permite la realización de pruebas de vuelo en zonas de espacio restringido, como los laboratorios universitarios. Se ha diseñado una base giroscópica que restringiendo 3 grados de libertad de la aeronave permite estudiar el control de los 3 grados de libertad restantes.

Agradecimientos

Este proyecto es la culminación de cuatro años de duro trabajo. Agradezco a continuación a todas las personas que me han acompañado y apoyado a largo del trayecto.

A mis padres y a mi hermana que siempre han estado a mi lado desde mi infancia, quiero agradecerles el continuo apoyo profesado y el enseñarme el amor por el conocimiento. A toda mi familia y amigos, les agradezco su continua comprensión e interés a lo largo de este camino, sin el cual no habría llegado hasta donde estoy hoy.

También quisiera agradecer especialmente a mi tutor, Sergio, la oportunidad de realizar este proyecto. Gracias por darme la oportunidad de juntar todos los conocimientos que he reunido en esta carrera y ayudarme a crear algo nuevo.

Finalmente, quisiera acordarme del ingeniero que desde pequeño me hizo amar la ingeniería. Gracias Abu, este proyecto va especialmente dedicado a ti.

Índice general

1. Objetivos y Alcance del Proyecto.	1
1.1. Objetivos.	1
1.2. Tareas a realizar.	2
2. Introducción y Antecedentes.	5
2.1. Introducción a los UAVs.	5
2.1.1. Definición y clasificación	5
2.1.2. Historia	6
2.2. Introducción a la mecánica de vuelo de cuadricópteros.	10
2.3. Introducción a plataformas de pruebas para cuadricópteros.	15
2.4. Introducción a la impresión 3D.	16
2.5. Rodamientos y anillos rozantes.	17
2.6. Especificaciones del proyecto.	18
2.6.1. Especificaciones del cuadricóptero.	18
2.6.2. Especificaciones de la plataforma.	19
3. Soluciones Alternativas.	21
3.1. Configuraciones de plataformas de pruebas	21
3.2. Alternativas Constructivas	22
3.2.1. Solución 1: Base Giroscópica de Dos Anillos Impresa en 3D	22
3.2.2. Solución 3: Base Giroscópica de Aluminio Ligero con Dos Anillos.	25
4. Solución Adoptada.	29
4.1. Diseño del cuadricóptero.	29
4.2. Anillo.	32
4.2.1. Diseños iniciales.	32
4.2.2. Diseño final.	37
4.3. Soporte del anillo.	43
4.4. Base.	46
4.5. Alimentación de la base giroscópica.	47
4.6. Montaje de la estructura completa.	47
5. Tests y Resultados.	49
5.1. Tests de resistencia, método de elementos finitos	49

5.1.1. Análisis estructural del UAV	50
5.1.2. Análisis estructural del Anillo	54
5.1.3. Análisis estructural de las piezas de acople entre el anillo y las columnas metálicas	58
5.2. Tests de funcionamiento	63
5.2.1. Prueba de peso muerto	63
5.2.2. Prueba a máxima tracción	63
6. Conclusiones.	65
Bibliografía	67

Índice de figuras

2.1. Clasificación de UAVs por tipo de aeronave. Fuente http://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html	7
2.2. Diseño del UAV que bombardearía la ciudad de Viena. Fuente: http://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html	7
2.3. Dibujo del giroscopio que diseñó Elmer Sperry. Fuente: http://www.sperrymarine.com/corporate-history/sperry-marine	8
2.4. Comienzo de los UAVs	8
2.5. UAVs modernos.	10
2.6. El futuro de los UAVs.	11
2.7. Cuadricóptero, sistema de referencia inercial (I) y sistema de referencia ligado al cuerpo (B) [12]	12
2.8. Cuadricóptero, momentos debidos a la diferencia de tracción en los motores [12]	14
2.9. Plataformas de 3 grados de libertad.	16
2.10. Impresora 3D da Vinci 1.0A. Fuente: http://eu.xyzprinting.com/eu_es/Product/da-Vinci-1.0A	17
3.1. Pieza macho del anillo interior.	23
3.2. Pieza hembra del anillo interior capaz de acoplar un anillo rozante.	24
3.3. Ensamblaje del anillo interior con un anillo rozante del tipo 1.	24
3.4. Base giroscópica de dos anillos impresa en 3D.	25
3.5. Detalle acople superior entre estructura metálica y anillo exterior en la base giroscópica de dos anillos impresa en 3D.	26
3.6. Detalle acople inferior entre estructura metálica y anillo exterior en la base giroscópica de dos anillos impresa en 3D.	26
3.7. Anillo interior de aluminio.	27
3.8. Detalle de rebordado del anillo interior de aluminio.	27
4.1. Motores utilizados en el UAV. (Imagen de http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=304)	30
4.2. Placa electrónica “BeagleBone Blue”. (Imagen de https://beagleboard.org/blue)	31
4.3. Imagen de la estructura del UAV.	31

4.4. Primera pieza diseñada.	32
4.5. Foto de la primera pieza diseñada.	33
4.6. Segunda pieza diseñada parte macho.	34
4.7. Segunda pieza diseñada parte hembra.	34
4.8. Anillo formado por las piezas del segundo diseño.	35
4.9. Foto de la segunda pieza diseñada.	35
4.10. Acople que forman las piezas del tercer diseño.	36
4.11. Vista explosionada de un acople donde se puede introducir un elemento externo.	37
4.12. Pieza macho con muesca para acoplar el anillo rozante a la izquierda.	38
4.13. Pieza macho con muesca para acoplar el anillo rozante a la derecha.	38
4.14. Pieza macho con rebaje a la derecha.	39
4.15. Pieza macho con rebaje a la izquierda.	39
4.16. Pieza hembra lisa.	40
4.17. Pieza hembra que permite acoplar el stator del anillo rozante 2.	41
4.18. Ensamblaje final de las piezas que acoplan el anillo rozante 2.	41
4.19. Pieza hembra que acopla el rotor del anillo rozante 1.	42
4.20. Ensamblaje entre el rotor del anillo rozante 1 y el anillo.	42
4.21. Ensamblaje del anillo.	43
4.22. Pieza macho que acopla el anillo rozante 1.	44
4.23. Pieza hembra que acopla el anillo rozante 1.	44
4.24. Ensamblaje explosionado de las piezas que abrazan al anillo rozante 1.	45
4.25. Columna de hierro.	45
4.26. Ensamblaje de piezas que soportan el anillo.	46
4.27. Base circular de la estructura.	47
4.28. Ensamblaje final.	48
5.1. Sujeciones del cuadricóptero aplicadas en el análisis de elementos finitos.	51
5.2. Estructura del cuadricóptero con la señalización de las cargas aplicadas mediante líneas púrpuras.	52
5.3. Malla del cuadricóptero.	52
5.4. Resultado de las tensiones de <i>von Mises</i> a lo largo de la estructura del cuadricóptero.	53
5.5. Resultado de las deformaciones del cuadricóptero tras la simulación.	54
5.6. Posición de las cargas y sujeciones en el anillo.	55
5.7. Malla del anillo.	56
5.8. Simulación de las deformaciones del anillo bajo las cargas estudiadas.	57
5.9. Simulación de las tensiones de <i>von Mises</i> del anillo bajo las cargas estu- diadas.	58
5.10. Ilustración de la sección fijada en el análisis marcada en rojo.	59
5.11. Mallado de la estructura que une el anillo con las columnas metálicas.	60
5.12. Solución de desplazamientos del análisis realizado en la unión entre el anillo y la estructura metálica.	61

5.13. Tensiones de *von Mises* en la unión entre el anillo y la estructura metálica. 62
5.14. Foto de la estructura una vez realizado el montaje. 64

Índice de tablas

2.1. Especificaciones mínimas del cuadricóptero	18
2.2. Especificaciones mínimas de la plataforma giroscópica	19
5.1. Condiciones de todos los análisis de elementos finitos realizados	50
5.2. Propiedades del material ABS	50
5.3. Propiedades de la estructura del cuadricóptero	50
5.4. Propiedades de la malla utilizada en el análisis del cuadricóptero	51
5.5. Propiedades estructurales del ensamblaje del anillo	54
5.6. Propiedades de la malla utilizada en el análisis del anillo	56
5.7. Propiedades estructurales del ensamblaje del anillo	58
5.8. Propiedades de la malla utilizada en el análisis de la pieza de acople entre el anillo las columnas metálicas	59

Capítulo 1

Objetivos y Alcance del Proyecto.

El presente proyecto pretende resolver el problema que conlleva desarrollar análisis de control de cuadricópteros en laboratorios. En este caso el problema reside en que la mayoría de laboratorios, a no ser que hayan sido diseñados para ello, no son capaces de albergar varios dispositivos volando a la vez. La solución al problema que se ha presentado no es única y se han propuesto diversas soluciones, en general costosas y de difícil realización. Este proyecto pretende diseñar un sistema capaz de analizar el control de actitud de manera precisa y con una disminución considerable del coste. Para ello se ha diseñado una plataforma de pruebas, en forma de base giroscópica, en la que se puede acoplar un cuadricóptero como se muestra en la figura 4.28.

1.1. Objetivos.

Los objetivos a cumplir en este proyecto son:

- Diseñar una base giroscópica que pueda ser usada para la docencia.
- Realizar un diseño que sea de uso fácil e intuitivo.
- Realizar un diseño que pueda ser impreso con una impresora 3D.
- Realizar un diseño que sea de fácil reparación en caso de fallo de alguno de sus componentes.
- Realizar un diseño que sea sólido estructuralmente.
- Realizar un diseño con el que no sea necesaria alimentar con baterías al cuadricóptero.
- Incluir en la plataforma del cuadricóptero el hardware necesario para su correcto funcionamiento.

1.2. Tareas a realizar.

Las tareas que se deben completar para llevar a cabo este proyecto se pueden dividir en cuatro secciones diferenciadas: diseño, fabricación, montaje y validación.

- Diseño mediante CAD:

En primer lugar, se debe realizar una base giroscópica en la cual la mayoría de piezas sean fabricadas mediante impresión 3D. En este caso las piezas que conforman el anillo de la base giroscópica y la estructura del UAV deben ser diseñadas para poder fabricarse con la impresora del departamento de Ingeniería de Sistemas Automáticos.

En segundo lugar, se debe diseñar el soporte metálico que levante el anillo en el cual se encuentra el UAV. Esta estructura metálica debe permitir el giro del anillo y a su vez soportar su peso.

Todos los diseños deben ser analizados mediante un software de elementos finitos para comprobar que cumplen los requisitos mínimos estructurales.

Por último, se debe diseñar un sistema mediante el cual se pueda alimentar el UAV sin necesidad de baterías.

- Fabricación:

Una vez realizado el diseño, se deben fabricar todas las piezas que forman la estructura. Se usarán las impresoras 3D de la Universitat Politècnica de València para imprimir todas las piezas diseñadas. Al mismo tiempo se deben mecanizar aquellas piezas que no se puedan fabricar mediante fabricación aditiva.

Finalmente, una vez acabado el proceso de fabricación se deben validar todas las piezas y volver a fabricar aquellas que no cumplan con los requerimientos de calidad para evitar posibles fallos estructurales.

- Montaje:

Cuando el proceso de fabricación haya acabado se debe montar toda la estructura.

Primeramente, se debe atornillar el UAV al tubo de aluminio. Una vez atornillado se montará junto con el anillo.

A continuación, se montarán los soportes metálicos y se unirán a la estructura formada por el anillo y el UAV.

Finalmente, se unirá a una base circular y montará el sistema de alimentación del UAV.

- Validación:

Para concluir, una vez montada la base giroscópica se someterá a la misma a diversas pruebas para validar su funcionalidad. En este caso, deberá superar pruebas

estructurales y de funcionalidad.

Capítulo 2

Introducción y Antecedentes.

Hasta hace una década la aviación civil ha estado basada en el pilotaje de una aeronave desde dentro de la misma. El reciente auge de pequeñas aeronaves pilotadas de manera remota ha creado mayores desafíos en los campos de la automatización de sistemas y de la mecánica de vuelo.

Este proyecto presenta una solución a uno de los problemas que dificulta el proceso de ensayos y validación de los ingenieros que trabajan en estos campos. El estudio de control de este tipo de sistemas no solo requiere un gran conocimiento teórico de las aeronaves con las que se trabaja, también una validación práctica. Este trabajo de final de grado presenta una manera de validar los sistemas de control en espacios de pequeño tamaño, como puede ser un laboratorio universitario.

A continuación y antes de entrar en detalle en la composición del proyecto, se presenta una breve introducción al tema. Se procederá explicar brevemente los vehículos aéreos no tripulados, la mecánica de vuelo de cuadricópteros, las plataformas de prueba, la impresión 3D, los rodamientos y anillos rozantes y las especificaciones del proyecto.

2.1. Introducción a los UAVs.

2.1.1. Definición y clasificación

En primer lugar, para poder comprender correctamente el tipo de aeronave al que se referirá durante el resto del proyecto se presentan a continuación dos definiciones, la del doctor Antonio Barrientos y la oficial de la OACI.

El profesor de la UPM Antonio Barrientos presenta una definición muy completa de este tipo de aeronaves [1]:

“Se entiende por una aeronave no tripulada (UAV) a aquella que es capaz de realizar una misión sin necesidad de tener una tripulación embarcada. Debe

entenderse que esta condición no excluye la existencia de piloto, controlador de la misión u otros operadores, que pueden realizar su trabajo desde tierra. La extensión del concepto de vehículo a sistema refleja que el UAS precisa no solo de la aeronave adecuadamente instrumentada si no también de una estación en tierra que completa la instrumentación y capacidades embarcadas.”

La OACI los define de la siguiente manera [9]:

“ An unmanned aerial vehicle is a pilotless aircraft, in the sense of Article 8 of the Convention on International Civil Aviation, which is flown without a pilot-in-command on-board and is either remotely and fully controlled from another place (ground, another aircraft, space) or programmed and fully autonomous.”

Es decir, un UAV es una aeronave que es volada sin un piloto a bordo y o es controlada completamente de manera remota (desde tierra, otra aeronave o el espacio) o está programada y es completamente autónoma.

Por ende, como explica Barrientos [1], se debe tener en cuenta que un UAV puede ser pilotado desde tierra o puede tratarse también de un sistema completamente autónomo capaz de desarrollar la misión que le ha sido asignada sin que intervenga ningún humano. En el caso del segundo tipo de sistemas se les conoce como AA (Autonomous Aircraft, aeronave autónoma) o AAS (Autonomous Aerial System, sistema aéreo autónomo).

Estas dos definiciones abarcan un amplio grupo de aeronaves. La clasificación de las mismas se puede realizar de distintas maneras, para este proyecto se clasificarán por el tipo de aeronave. Como se puede observar en la figura 2.1 los UAVs se pueden clasificar en dos grandes familias; aeronaves que pueden despegar en vertical y aeronaves que no pueden despegar en vertical. Dentro de la primera familia de UAVs se encuentran dos categorías: en primer lugar aquellas aeronaves que pueden sustentarse gracias a uno o varios rotores, en segundo lugar aquellas aeronaves que se denominan auto-sustentadas.

El presente trabajo está enfocado a los UAVs con cuatro alas rotativas también llamados cuatrirotores.

2.1.2. Historia

La historia de los vehículos aéreos no tripulados está ligada, como en la mayoría de la historia aeronáutica, a la guerra. El primer documento que registra el uso de este tipo de aeronaves data de antes de que los hermanos Wright diseñasen su primera aeronave. En 1849 los Austriacos usaron 200 globos sin piloto como los de la figura 2.2 para bombardear la ciudad de Venecia. Como explica Keane [6] se puede decir que el primer UAV fue de la clase auto-sustentados.

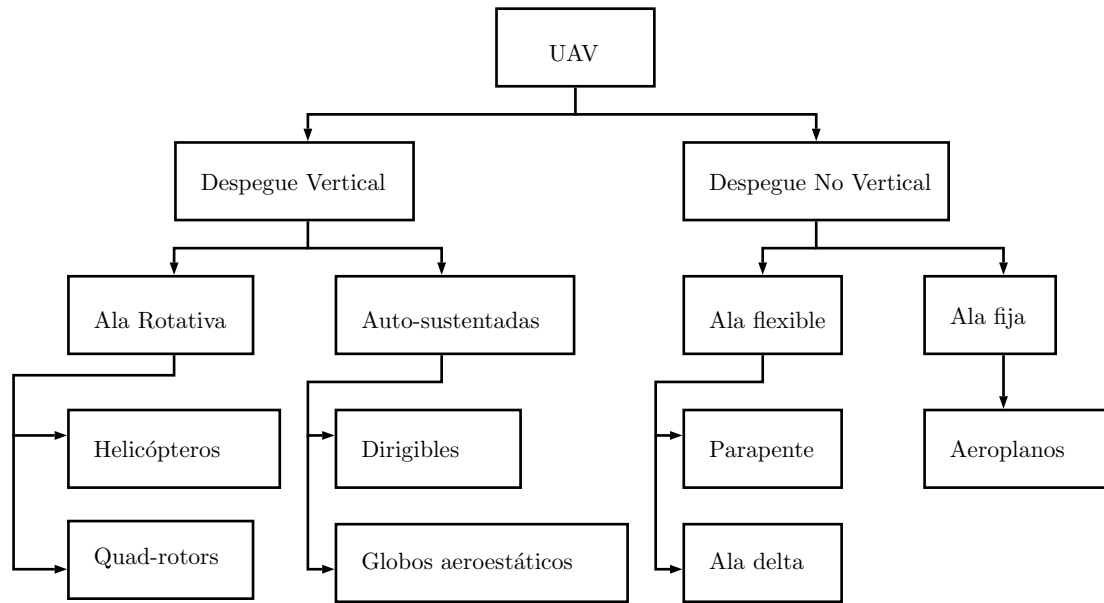


Figura 2.1: Clasificación de UAVs por tipo de aeronave. Fuente http://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html



Figura 2.2: Diseño del UAV que bombardearía la ciudad de Viena. Fuente: http://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html

Nikola Tesla fue el siguiente en pensar en la posibilidad de diseñar un vehículo aéreo sin piloto a bordo. El propio Tesla diseñó varios torpedos que podían ser controlados mediante ondas radio. Sin embargo, fue su amigo Elmer Sperry, con el cual Tesla había compartido sus ideas sobre los UAV, el que recibió el primero contrato de la armada estadounidense para diseñar un UAV en octubre de 1917. Elmer Sperry diseñó un giroscopio, como el de la figura 2.3, capaz de mantener un avión volando, por primera vez, de manera estable sin la necesidad de un control humano. Como se puede observar en el artículo de Blom [2], durante la Primera Guerra Mundial el ejercito estadounidense promovió más proyectos como el de Sperry pero ninguno llegó a usarse antes de que acabase la guerra.

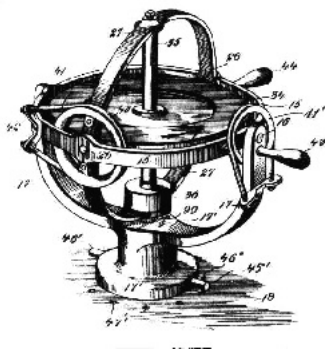
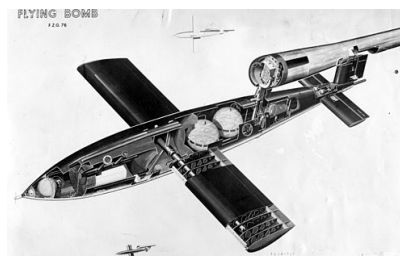
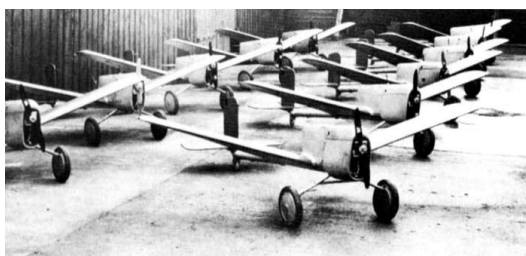


Figura 2.3: Dibujo del giroscopio que diseñó Elmer Sperry. Fuente: <http://www.sperrymarine.com/corporate-history/sperry-marine>

En el periodo entre las dos Guerras Mundiales, Inglaterra impulsó varios proyectos sobre UAVs. Los proyectos se podían clasificar en dos tipos: bombas voladoras y aeronaves para practicar con la artillería antiaérea. En 1933 el modelo conocido como “Fairley Queen” consiguió esquivar durante dos horas los proyectiles antiaéreos. Este proyecto ayudó a entender la utilidad de aviones no tripulados. La armada británica también desarrolló el UAV conocido como “Queen Bee” (Abeja Reina). Este UAV controlado por radio podía ser aterrizado y alcanzaba velocidades de 160 km/h. Sin embargo, nunca fue usado de manera bélica. El “Queen Bee” fue usado como objetivo en las prácticas para los pilotos británicos.



(a) UAVs “Queen Bee”. Fuente: <http://www.vintagewings.ca/>. (b) UAV “V-1”. Fuente: <http://www.pbs.org/>

Figura 2.4: Comienzo de los UAVs

Durante la Segunda Guerra Mundial, Alemania hizo grandes progresos en la tecnología de los UAV. Durante este periodo los alemanes desarrollaron el arma llamada

“V-1”. Se trataba de un misil que podía alcanzar los 804 km/h mientras transportaba 907 kg de explosivos. El UAV “V-1” usaba un sistema de guiado simple, solo regulaba la altitud y la velocidad. Se llegó a plantear usar un sistema de radio-control para ataques precisos pero el gobierno lo descartó debido a que decidió utilizarlo contra Londres.

Uno de los drones más usados en las décadas de 1960 y 1970 fue el “AQM-34 Ryan Firebee”. Los Estados Unidos realizaron más de 34.000 vuelos de reconocimiento sobre el sureste asiático con este UAV. El “AQM-34 Ryan Firebee” se caracterizaba por ser lanzado desde un avión en vuelo y ser controlado por pilotos que se encontraban dentro del avión desde el que despegaba. Después de realizar su misión el UAV se dirigía a una zona segura donde desplegaba un paracaídas y era recogido por un helicóptero.

Más adelante, al final de la década de 1970 y comienzo de la década de 1980 se desarrollaron en Israel dos nuevos tipos de UAV, los conocidos como Scout y Pioneer. El UAV Scout era una aeronave hecha de fibra de vidrio y de 4m de envergadura. Al ser su fuselaje de fibra de vidrio era muy difícil de detectar por radar, lo que unido a su pequeño tamaño significa que este UAV era casi imposible de derribar. Además, este UAV podía transmitir vídeo de 360° en directo desde una cámara de televisión en su torreta central. En 1982 Israel usó esta aeronave durante el conflicto del Valle de la Becá para encontrar donde estaban situados los silos de misiles sirios sin ser detectados. El UAV Pioneer se convirtió en el primer UAV pequeño y de bajo coste que usó la armada americana. Fue usado en la primera Guerra del Golfo y más tarde en Bosnia para detectar blancos que se encontraban en movimiento.

Actualmente los tres UAV bélicos más conocidos son el UAV “RQ-1 Predator”, el UAV “DarkStar” y el UAV “RQ-4 Global Hawk” del ejército estadounidense. El UAV “DarkStar” fue una aeronave de reconocimiento creada por Lockheed Martin y Boeing. Esta aeronave debía volar indetectada a 14.000m y ser capaz de retransmitir imágenes de soldados en tierra. El dron “RQ-1 Predator”, de la figura 2.5b, es uno de los drones más conocidos de todos los tiempos. El “RQ-1 Predator” ha sido creado por General Atomic Aeronautical Systems y el ejército del aire americano. Esta aeronave es capaz de volar más de 450 millas náuticas y puede grabar 16 horas de reconocimiento mediante cámaras infrarrojas, la cámara de alta definición y el radar de apertura sintética que lleva abordo. Aunque este UAV fue creado con objetivos de reconocimiento varias de estas aeronaves han sido equipadas con misiles antitanques “Hellfire”. Aunque el dron “RQ-4 Global Hawk” aun está considerado en fase de desarrollo ya ha sido utilizado en varias misiones militares. Este UAV fue diseñado por Teledyne Ryan con el objetivo de poder despegar desde una base en Estados Unidos, volar de forma autónoma hasta el destino de interés, recolectar información de vigilancia y ser capaz de volar de vuelta a la base de origen sin repostar.

Hoy en día, los UAV son usados en todo el mundo para todo tipo de misiones. Aunque los UAV son pieza clave en todos los ejércitos actuales ya son no usados solamente para fines bélicos. Dentro de la categoría de UAV con fines civiles podemos encontrar el UAV “Firebird” y el UAV “Pathfinder” que podemos ver en la figura 2.5a. En 1996 Israel

desarrolló el UAV “Firebird”, usado para tomar datos en tiempo real sobre incendios y de esta manera ayudar a extinguirlos. En 1997 la corporación AeroVironment desarrolló el UAV “Pathfinder”, un UAV propulsado por energía solar que llega a alcanzar 20.000 m de altitud. El UAV “Pathfinder” es usado para recolectar información atmosférica mediante sensores de extrema precisión y cámaras de alta resolución.



(a) UAV “Pathfinder”. Fuente: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/Pathfinder/EC95-43261-1.html>
 (b) UAV “RQ-1 Predator”. Fuente: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/Pathfinder/EC95-43261-1.html>

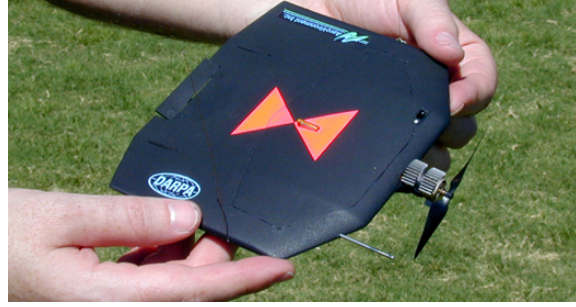
Figura 2.5: UAVs modernos.

Además, hoy en día se pueden encontrar nuevos UAV de uso civil que por primera vez están dirigidos al público general. Este tipo de UAV se encuentran en la sección de multirrotores en la clasificación de la figura 2.1 y sobre los que se basará el resto del proyecto. Los mayoría de multirrotores que se están diseñando a día de hoy, como los de la figura 2.6a, están enfocados a gente sin experiencia previa en el pilotaje de este tipo de aeronaves, por lo que es importante que estén dotados de sistemas de control adecuados.

Actualmente, se está intentando reducir el tamaño de los UAV de manera que en un futuro haya microaeronaves, como las de la figura 2.6b, también llamados MAVs. Los gobiernos de las mayores potencias mundiales están estudiando la posibilidad de usar MAVs para misiones de reconocimiento. Este tipo de aeronaves serían capaces de volar cerca del objetivo de forma indetectada y recolectar información valiosa. Serían la siguiente generación de espías.

2.2. Introducción a la mecánica de vuelo de cuadricópteros.

La estructura que se diseña en este proyecto pretende ayudar en el diseño de algoritmos de control de cuadricópteros. En este caso para poder desarrollar nuevos algoritmos de control que permitan volar al cuadricóptero primero se debe realizar un modelo matemático del mismo. Este modelo nos permitirá comprender como se comportará el



(a) UAV multirotor “ZMR250”. Fuente: https://www.fpvmodel.com/blog/zmr250-v2-build-manual_show114.html
 (b) MAV “Black Widow”. Fuente: <https://www.avinc.com/innovative-solutions/small-uas>

Figura 2.6: El futuro de los UAVs.

cuadricóptero mediante el uso de fórmulas matemáticas.

Lo primero que se debe tener en cuenta al obtener el modelo es que el cuadricóptero solo podrá rotar alrededor de un punto del espacio por lo que no hará falta tener en cuenta las ecuaciones de traslación. El modelo matemático se realizará usando las ecuaciones de la mecánica de cuerpos rígidos de Newton-Euler: “La sumatoria de momentos externos que actúan en un cuerpo rígido producen en él una aceleración angular proporcional a su valor e inversamente proporcional a su momento de inercia”. Podemos ver su expresión matemática en la ecuación 2.1.

$$\sum_{i=0}^n \vec{M} = I_{cg} \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times I_{cg} \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad (2.1)$$

Se deben definir dos sistemas de referencia: uno inercial (I) y uno que esté ligado al cuerpo (B). El sistema que está ligado al cuerpo tiene su origen en el centro de gravedad del cuadricóptero como podemos ver en la figura 2.7. El uso de un sistema de referencia es muy útil ya que nos permite expresar las velocidades angulares del cuerpo de una manera sencilla e intuitiva.

Una vez se definen ambos sistemas de referencia la ecuación 2.1 queda de la siguiente manera:

$$\sum_{i=0}^n \vec{M}_i = I_{cg} {}^B \dot{\vec{\omega}} + {}^B \vec{\omega} \times I_{cg} {}^B \vec{\omega} \quad (2.2)$$

Para definir la actitud del cuadricóptero debemos saber la orientación de sus ejes cuerpo de referencia. Aunque lo más común en la programación de los algoritmos es usar un sistema de cuaterniones, en este trabajo se realizará la aproximación mediante Ángulos de Euler. Este método es más intuitivo aunque conlleva una serie de singularidades. Estos ángulos relacionan mediante tres rotaciones un sistema no inercial (B) con respecto a un sistema inercial (I). Comenzando siempre desde el sistema inercial (I) se realizan las tres rotaciones consecutivas. Los ángulos que se usarán son los siguientes:

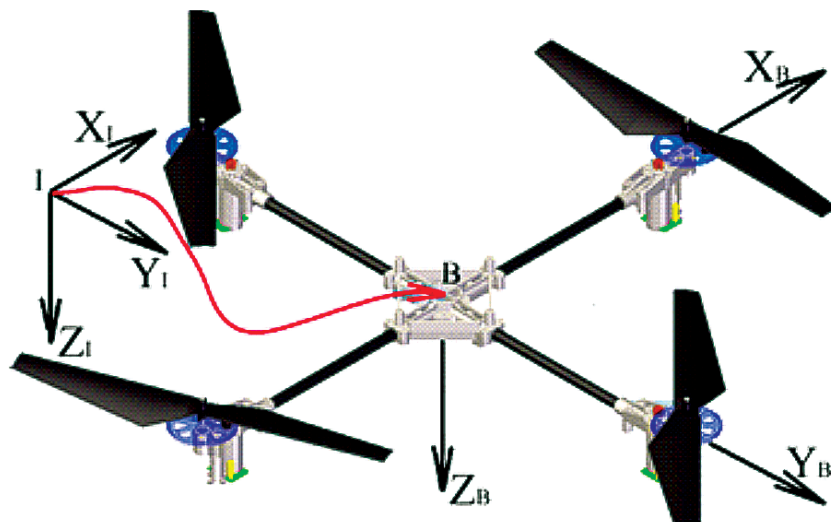


Figura 2.7: Cuadricóptero, sistema de referencia inercial (I) y sistema de referencia ligado al cuerpo (B) [12]

$$\begin{cases} \phi : \text{Ángulo de asiento lateral} \\ \theta : \text{Ángulo de asiento longitudinal} \\ \psi : \text{Ángulo de rumbo (azimut)} \end{cases} \quad (2.3)$$

En este caso la secuencia de giros que se usará será la conocida como secuencia {321} [7]. En primer lugar, se efectúa un giro alrededor del eje Z, posteriormente alrededor del eje Y y finalmente alrededor del eje X, ($\psi \rightarrow \theta \rightarrow \phi$). Por lo que la matriz de rotación para expresar cualquier vector del sistema inercial en el sistema de ejes cuerpo viene dada en la ecuación 2.4.

$$M_{Body \leftarrow Inertial} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \phi \cos \theta \\ \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Se debe conocer el vector de velocidades angulares alrededor de los ejes cuerpo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\vec{\omega}_B = \begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

Estas velocidades angulares están ligadas a las derivadas de los ángulos de Euler mediante la matriz 2.4.

Una de las ventajas de la mayoría de los cuadricópteros es que tienen dos planos de simetría como se puede ver en la figura 2.7. Este hecho simplifica los términos de inercia de las ecuaciones de Newton-Euler ya que los productos de inercia son todos nulos. Por lo tanto, la matriz de inercia será una matriz diagonal:

$$I_{quad} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Una vez conocida la expresión de las velocidades angulares y de la matriz de inercia la ecuación 2.2 se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p \\ q \\ r \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Simplificando la ecuación 2.7 se obtienen las ecuaciones 2.8:

$$\begin{cases} M_x = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr \\ M_y = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr \\ M_z = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq \end{cases} \quad (2.8)$$

La única incógnita en las ecuaciones son los momentos que sufre el cuatrirotor alrededor de cada eje. Los momentos que sufre el cuerpo vienen dados por los cuatro propulsores de los que dispone. El empuje que generan los propulsores del cuatrirotor siempre será paralelo al eje de guiñada (eje Z_B). El modelo que se usará para describir el empuje (T) que realiza cada hélice será el también usado por los doctores Peña, Vivas e Ivonn [12] que viene dado por la ecuación 2.9.

$$T = C_T \rho A (\Omega R)^2 \quad (2.9)$$

Donde ρ es la densidad del aire, A es el área barrida por la hélice, Ω es la velocidad angular de la hélice, R es el radio de la hélice y C_T es un coeficiente hallado de manera experimental o teórica mediante la ecuación:

$$C_T = \sigma a \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{4} \mu^2 \right) \left(\theta_0 - (1 - \mu^2) \frac{\theta_{\tau\omega}}{4} - \frac{1}{4} \lambda \right) [12] \quad (2.10)$$

En la ecuación 2.10 σ es la relación de solidez, a es la pendiente de sustentación, μ es la relación de avance del rotor, θ_0 es el ángulo de incidencia del perfil en la raíz de la hélice, y $\theta_{\tau\omega}$ es la variación del ángulo de incidencia del perfil al final de la hélice.

El movimiento de la hélice en un cuatrirotor también genera un número de momen-

tos que deben tenerse en cuenta en las ecuaciones de Newton-Euler. En este modelo se tendrán en cuenta cinco momentos distintos. En primer lugar, pueden existir unos momentos alrededor del eje X_B y del eje Y_B debido a la diferencia de empuje de los motores como se puede ver en la figura 2.8. En segundo lugar, en cada hélice existirá un momento generado por la diferencia de resistencia aerodinámica que existe entre la semihélice que avanza y la semihélice que retrocede cuando existe una velocidad de translación del cuadricóptero. La fuerza que genera este momento será llamada H_i . En tercer lugar, en cada hélice existirá un momento generado por la diferencia de sustentación que existe entre la hélice que avanza y la que retrocede cuando existe una velocidad de translación del cuadricóptero. El momento que genera la diferencia de sustentación en cada hélice será llamado R_m . En cuarto lugar, existe un momento debido al desbalance en los movimientos de las hélices que giran a derechas con los que giran a izquierdas. Este momento es conocido como Q . Por último, se debe tener en cuenta los efectos giroscópicos del propulsor con respecto a los tres ejes. Estos momentos están generados por el giro de las hélices con velocidad angular relativa respecto a otro marco de referencia.

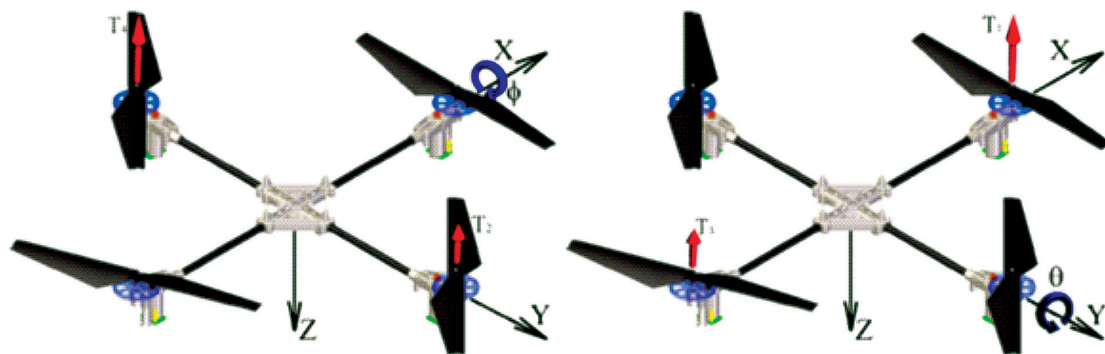


Figura 2.8: Cuadricóptero, momentos debidos a la diferencia de tracción en los motores [12]

En consecuencia, los sumatorios de momentos de la ecuación 2.2 quedarán de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 M_x = l_1(T_4 - T_2) + (-1)^{i+1} \sum_{i=1}^4 R_{mxi} - l_2 \left(\sum_{i=1}^4 H_y i \right) + J_r \dot{\theta} \Omega_r \\ \sum_{i=1}^4 M_y = l_1(T_1 - T_3) + (-1)^{i+1} \sum_{i=1}^4 R_{myi} - l_2 \left(\sum_{i=1}^4 H_x i \right) + J_r \dot{\phi} \Omega_r \\ \sum_{i=1}^3 M_z = l_1 [(H_{x2} - H_{x4}) + (H_{y3} - H_{y1})] + (-1)^i \sum_{i=1}^4 Q_i + J_r \dot{\Omega}_r \end{cases} \quad (2.11)$$

Este sistema de ecuaciones junto con las ecuaciones 2.8 proporcionan un modelo matemático para el movimiento de rotación del cuadricóptero. Este modelo matemático no lineal es fundamental en los algoritmos de control. A partir de estas ecuaciones los ingenieros pueden trabajar en algoritmos de control de la aeronave.

2.3. Introducción a plataformas de pruebas para cuadricópteros.

Tal y como comentan los profesores Yu y Ding [13], el desarrollo de nuevos algoritmos de control para vehículos aéreos es un proceso lento y peligroso. Se deben realizar múltiples pruebas, comenzando por simulaciones sencillas en ordenadores y acabando con pruebas de vuelo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que entre las simulaciones más sofisticadas y las pruebas de vuelo existen grandes diferencias debido a las limitaciones que sufren los modelos matemáticos empleados. Hasta el comienzo del desarrollo de este tipo de bancos de pruebas, todos los test de vuelo debían realizarse asumiendo ciertos riesgos. Las plataformas de pruebas permiten reducir la distancia que existe entre las simulaciones por ordenador y las pruebas de vuelo, al permitir probar los algoritmos de manera real pero sin movimiento de traslación de la aeronave, el uso de este tipo de bases permite eliminar el riesgo de colisión y de daños materiales.

Actualmente, se han desarrollado una pequeña cantidad de plataformas de pruebas desde varios grupos de investigación. La Universidad Nacional de Australia [10], la universidad de Stanford [5], la Universidad de La Rioja [11] y el Instituto Federal Suizo [3] han desarrollado sus propias plataformas. La mayoría de las plataformas diseñadas por estos grupos son de tres grados de libertad, como la que se diseña en este proyecto. Además de las plataformas diseñadas por grupos de investigación existen varias plataformas para cuadricópteros en el mercado, siendo la más popular probablemente la plataforma “Quanser 3 DOF Hover”. En la figura 2.9 se pueden observar varias plataformas de tres grados de libertad. Existen varias soluciones para poder obtener plataformas capaces de tener más grados de libertad sin embargo, la complejidad del sistema mecánico como el espacio requerido no las hacen idóneas para la docencia. La gran mayoría de plataformas como la “Quanser 3 DOF Hover” están basadas en una rótula que permite los tres grados de libertad pero a la vez limita el ángulo de giro que puede realizar el cuadricóptero.

Uno de los objetivos de este trabajo es que el diseño de la plataforma no sufra las limitaciones de giro que implica una rótula. Se usarán diseños giroscópicos que permiten un giro de 360° alrededor de los tres ejes. Este diseño implica ciertas consecuencias en el modelo del cuadricóptero que se debe usar. En primer lugar, la plataforma giroscópica modificará la inercia del modelo. La primera hipótesis que se usará en el trabajo es que al querer diseñar los controles alrededor de un punto de equilibrio la suma de las inercias del cuadricóptero y de la plataforma no variarán con el tiempo.

$$\frac{d(I_B + I_P)}{dt} \approx 0 \tag{2.12}$$

De esta manera el único cambio que sufrirán las ecuaciones 2.7 serán los valores de la matriz de inercia. El diseño de la plataforma tiene dos planos de simetría por lo que la matriz de inercia de la plataforma también es diagonal. La matriz de inercia total se

puede ver a continuación en la ecuación 2.13.

$$I_{Total} = I_B + I_P = \begin{bmatrix} I_{xx}^B & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy}^B & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz}^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{xx}^P & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy}^P & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz}^P \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

En segundo lugar, otro efecto de la plataforma a considerar sería el efecto suelo tal y como explica Cuerva [4]. Este fenómeno aerodinámico tiene lugar cuando el cuadricóptero está volando a una altura baja, del orden del radio de los rotores. Al volar cerca de un obstáculo que limite el desarrollo de la estela, para una potencia dada de los rotores, el cuadricóptero será capaz de sustentar un mayor peso. Este hecho se traduce en que si la plataforma no es suficientemente alta se puede llegar a cometer un error sistemático cuando se mida la potencia necesaria de los rotores para un cierto control.

Concluyendo, el uso de plataformas de prueba introduce errores tanto inerciales como aerodinámicos en los tests. Sin embargo, si se tienen en cuenta estos errores sistemáticos a la hora de comprobar los algoritmos de control, las plataformas de prueba reducen drásticamente la distancia existente entre ensayos de vuelo y simulaciones por ordenador.



(a) Plataforma “Quanser 3 DOF Ho- (b) Plataforma de la Universidad de La Rio-
ver”. Fuente [http://www.quanser.com/](http://www.quanser.com/Products/3dof_hover)
ja [11].
[Products/3dof_hover](http://www.quanser.com/Products/3dof_hover)

Figura 2.9: Plataformas de 3 grados de libertad.

2.4. Introducción a la impresión 3D.

La impresión 3D, o fabricación aditiva, es una tecnología de fabricación que permite agregar capa a capa distintos materiales para construir un objeto de tres dimensiones de forma precisa tal y como comenta López Conde [8].

La historia de esta tecnología se remonta a 1981 cuando el profesor Hideo Kodama publica un artículo sobre un sistema de prototipado rápido mediante el uso de polímeros. Desde entonces hasta ahora esta tecnología ha sufrido un desarrollo vertiginoso, por

ejemplo en 1991 se implantó el primer órgano impreso en 3D. En 2005 el doctor Adrian Bowyer creó la primera impresora que podía imprimir otras impresoras y a día de hoy existen impresoras que pueden imprimir en varios materiales por lo que pueden fabricar distintas versiones de un mismo producto.

En el ámbito de la docencia las impresoras 3D son muy útiles. Este tipo de fabricación permite crear prototipos de manera fácil, rápida y barata. Sin embargo, estas impresoras no son ideales para fabricar productos en masa ya que no son tan eficaces como otros métodos de fabricación al producir grandes volúmenes de un mismo producto.

En este proyecto se ha usado una impresora da Vinci 1.0A, como la de la figura 2.10, que ha permitido imprimir varias de las piezas necesarias en plástico ABS. El uso de esta impresora ha permitido fabricar varios prototipos en poco tiempo de manera que se ha acelerado el proceso hacia un producto final.

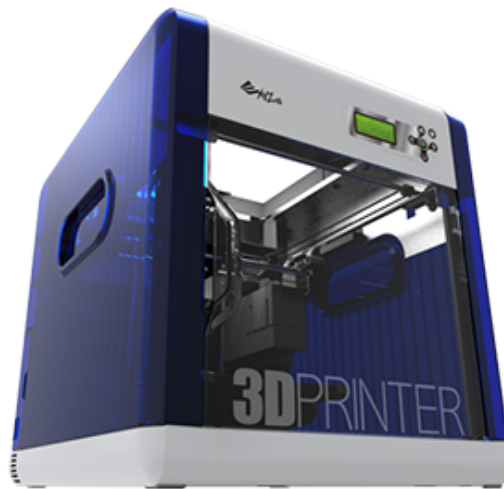


Figura 2.10: Impresora 3D da Vinci 1.0A. Fuente: http://eu.xyzprinting.com/eu_es/Product/da-Vinci-1.0A

2.5. Rodamientos y anillos rozantes.

A lo largo de este proyecto se han usado una variedad de rodamientos y anillos rozantes. Tal y como indica la Real Academia Española un rodamiento es:

“Cojinete formado por dos cilindros concéntricos entre los que se intercala una corona de bolas o rodillos que ruedan sobre ambas superficies”

Este cojinete es usado a lo largo del proyecto para evitar fricción en el eje entre elementos con movimientos relativos. Las especificaciones de todos los rodamientos que se han usado en la solución final se encuentran en el documento de anexos.

La Real Academia de Ingeniería define el anillo rozante como:

“Anillo conductor, montado en un eje giratorio, sobre el que se apoyan unas escobillas, que permite el paso de la corriente de un circuito a otro por contacto rozante.”

En este proyecto también se han usado distintos tipos de anillos rozantes. En concreto, se han usado dos tipos y todas las especificaciones se encuentran en el documento de anexos. A partir de este momento los anillos rozantes estarán descritos como tipo 1 y tipo 2 tal y como están indexados en el documento de anexos.

Tanto los rodamientos como los anillos rozantes son fundamentales en este proyecto ya que nos permiten el giro relativo entre piezas, pudiendo otorgarle al UAV sus tres grados de libertad.

2.6. Especificaciones del proyecto.

A continuación se especifica con más detalle los objetivos que se han planteado anteriormente. En esta sección se profundizará en las especificaciones técnicas que se esperan tanto del UAV como de la plataforma giroscópica.

2.6.1. Especificaciones del cuadricóptero.

La estructura del cuadricóptero debe asemejarse lo máximo posible a un UAV real. En este caso, los cuadricópteros a los que debe asemejarse es al “QAV250” y al “ZMR250”. En la tabla 2.1 se resume la especificaciones mínimas que debe cumplir el cuadricóptero que se ha de diseñar en el proyecto.

Tabla 2.1: Especificaciones mínimas del cuadricóptero

Especificaciones de tamaño	
Distancia máxima de punta a punta de aspa	40cm
Especificaciones de planta motriz	
Cantidad	4
Tipo	Escobillas
Potencia máxima continuada	260W
Hélice	Doble pala
ESC	1/motor
Especificaciones de placa de control	
Conectividad Wifi	Tecnología 802.11
Sistema Operativo	Linux
IMU incorporada	9 ejes
Control de motores	4 motores de escobillas
Memoria RAM	512 MB
Almacenamiento	2 GB

2.6.2. Especificaciones de la plataforma.

La plataforma que se va a diseñar para ensayar los algoritmos de control del UAV debe cumplir unos requisitos mínimos. Estos requisitos se pueden encontrar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Especificaciones mínimas de la plataforma giroscópica

Especificaciones de tamaño	
Volumen máximo	0,343 m^3
Diámetro máximo de la base	0,7m
Especificaciones de rotación	
Ángulos de rotación permitidos	360° en los 3 ejes
Elementos de rotación	Rodamientos y anillos rozantes
Especificaciones alimentación	
Método	Alimentación externa

La plataforma que se diseñe debe contener anillos rozantes que permitan alimentar el cuadricóptero desde una fuente de alimentación que esté estática en la base.

Capítulo 3

Soluciones Alternativas.

En este capítulo se profundizará en las soluciones que se han propuesto durante el proceso de diseño. Tal y como se ha explicado en la sección 2.3 existen múltiples tipos de plataformas de pruebas. Debido a los objetivos de este proyecto, las plataformas que se han propuesto deben cumplir unos requisitos específicos. Durante el proceso de desarrollo se han ido proponiendo soluciones alternativas y al final se ha seleccionado la que cumple todos los objetivos.

A continuación, se comentarán las distintas configuraciones de plataformas de pruebas que existen y sobre las que podría basarse cualquier proyecto de esta índole.

3.1. Configuraciones de plataformas de pruebas

Actualmente, existen múltiples configuraciones para las plataformas de pruebas. Aun así, se pueden diferenciar en dos grandes familias; aquellas que están diseñadas alrededor de un rótula y aquellas que se pueden denominar bases giroscópicas. La gran diferencia práctica entre ambas configuraciones se encuentra en las limitaciones que imponen al giro del UAV.

Las plataformas diseñadas con una rótula, como la “Quanser 3 DOF Hover” de la figura 2.9a, suelen ser más compactas. Esto es debido a la utilización de una articulación rotuliana y un pie vertical, lo cual les permite reducir su tamaño. Sin embargo, al usar este tipo de articulación la rotación que se puede ensayar estará limitada. Como se puede deducir de la figura 2.9, al llegar a un cierto ángulo de rotación en dos de los tres ejes la junta chocará contra el pie que la sujeta. Por lo tanto, esta configuración de plataformas impide un giro libre de 360°.

Las plataformas con rotación de anillos o giroscópicas están basadas en el diseño del movimiento de un giroscopio. En este tipo de plataformas se coloca el UAV en el centro y se le permite rotar junto con los anillos, como en el diseño de la Universidad de la Rioja 2.9b. Las plataformas giroscópicas permiten una rotación libre de 360° en

los tres ejes lo cual es una ventaja frente a la rotación limitada de las plataformas con rótula. Por contra, estas plataformas influyen en la inercia del sistema, dato que debe tenerse en cuenta al realizar los ensayos con el UAV, como se ha explicado en la sección 2.3.

Dadas las limitaciones de giro de una junta de rótula, se eligió trabajar con bases giroscópicas desde un principio. Las bases giroscópicas que se propusieron fueron las siguientes:

- 1) Base giroscópica impresa en 3D con dos anillos.
- 2) Base giroscópica impresa en 3D con un anillo y frame giratorio.
- 3) Base giroscópica de aluminio ligero con dos anillos.

Finalmente, por decisiones que se explican en el capítulo 4 se optó por fabricar la opción número 2.

3.2. Alternativas Constructivas

Las ventajas y desventajas de las soluciones 1 y 3 son comentadas en esta sección. Al estar ambas soluciones basadas en el concepto de bases giroscópicas la mayoría de las diferencias entre ellas residen en la diferencia de materiales constructivos.

3.2.1. Solución 1: Base Giroscópica de Dos Anillos Impresa en 3D

La base giroscópica de dos anillos impresa en 3D fue la primera solución diseñada y en la cual está basada la solución final. Esta plataforma, que se puede ver en la figura 3.4, contiene dos anillos construidos mediante piezas de impresión 3D y un frame metálico.

Debido al tamaño del anillo interior y del anillo exterior, 54cm y 66cm de diámetro exterior respectivamente, las impresoras 3D disponibles no permiten imprimir los anillos de una sola pieza. Por este motivo se han diseñado una serie de piezas que al ser ensambladas forman ambos anillos. Esta solución se ha aplicado al diseño final.

Los dos anillos que se han descrito anteriormente están apoyados sobre una estructura metálica, el material elegido en este caso fue acero. La estructura de 90cm de altura permite el giro alrededor del eje Z, por lo que su posición con respecto al dron forma un ángulo ψ .

La estructura del dron para este solución es la misma que ha sido utilizada en la solución final. Es una placa impresa en 3D que permite acoplar cuatro motores brushless. La placa microcontroladora iría atornillada de tal manera que el centro de gravedad del conjunto estuviese en el centro de la estructura del dron. La placa impresa en 3D estaría atornillada a un tubo de aluminio.

Tal y como se ha comentado anteriormente el anillo interior está formado de varias piezas impresas en 3D. En este caso se ha optado por diseñar ocho piezas macho y ocho piezas hembra que juntas forman el anillo interior. Dentro del grupo de piezas macho existen cuatro tipos de piezas distintas. En la figura 3.1 y en la figura 3.2 podemos ver dos de ellas. Los dos tipos de pieza restantes son piezas simétricas a las anteriores. Los rebajes a derecha o izquierda de las piezas son necesarios para poder acoplar los anillos rozantes o rodamientos necesarios, tal y como se puede ver en la figura 3.3. En el grupo de las piezas hembra existen dos grupos distintos, aquellas piezas que son lisas y aquellas piezas que permiten el acoplamiento de algún elemento externo. En este caso, el anillo interior incorpora dos anillos rozantes y dos rodamientos. Un anillo rozante y un rodamiento permiten el giro de la estructura del dron a lo largo del eje X, permitiendo el movimiento de alabeo " ϕ ".

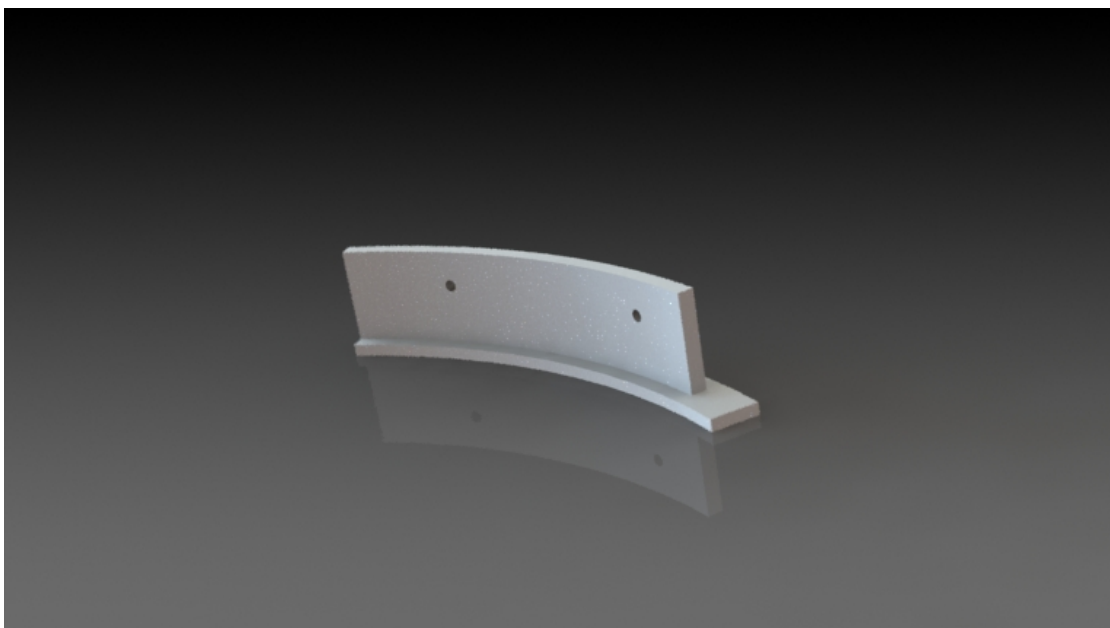


Figura 3.1: Pieza macho del anillo interior.

Al igual que el anillo interior, el anillo exterior está formado por ocho piezas macho y ocho piezas hembra. La unión entre el anillo interior y el anillo exterior a través de un rodamiento y un anillo rozante permite el movimiento de cabeceo del dron. Este movimiento es medido a través del ángulo θ .

Para poder unir los dos anillos con la estructura de soporte metálica se usan dos piezas de acople impresas en 3D. Estas piezas, que se pueden observar en las figuras 3.5 y 3.6, se encuentran atornilladas a la estructura metálica y a su vez contienen un rodamiento o un anillo rozante. Estas piezas de acople son de vital importancia en esta solución ya que permiten un montaje fácil de la estructura. En esta solución se puede realizar el montaje de los dos anillos posteriormente, gracias a los acoples, incorporándolos de manera lateral a la estructura.

Esta solución ha sido descartada debido al tamaño que deben tener los anillos. El tamaño de los anillos condiciona la estructura a ocupar $1m^3$. Este tamaño debe reducirse

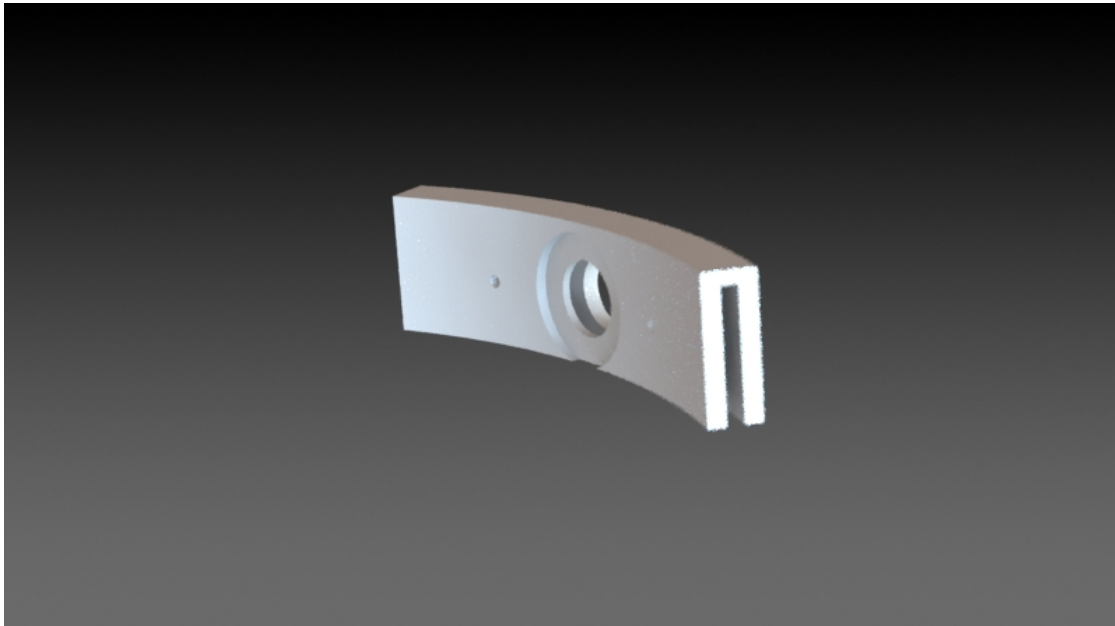


Figura 3.2: Pieza hembra del anillo interior capaz de acoplar un anillo rozante.

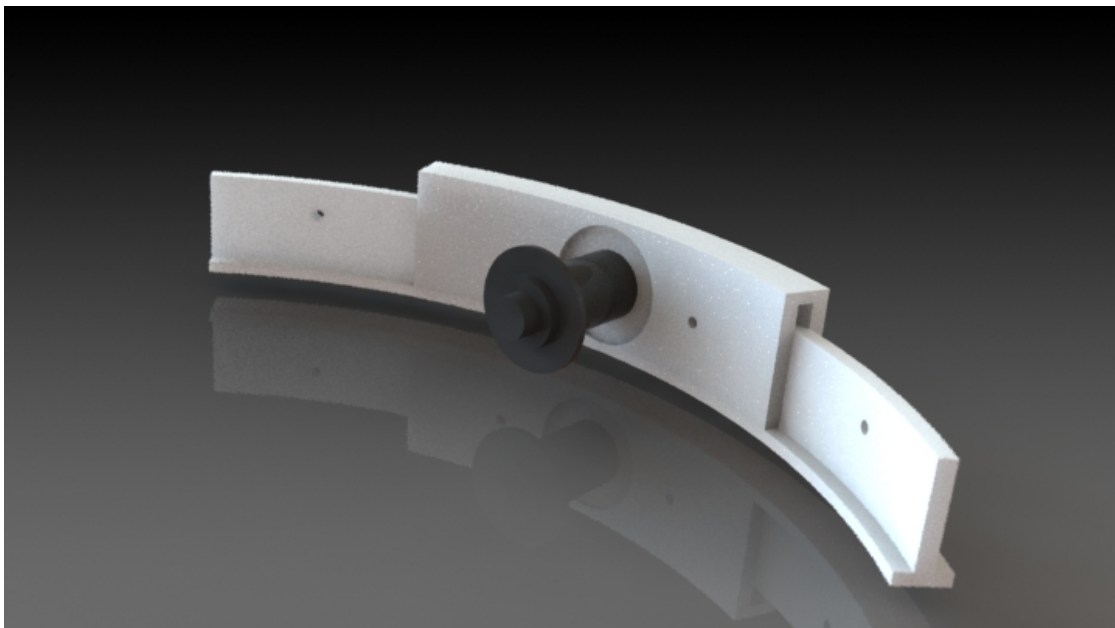


Figura 3.3: Ensamblaje del anillo interior con un anillo rozante del tipo 1.

si se pretende usar en una mesa de laboratorio para la docencia.



Figura 3.4: Base giroscópica de dos anillos impresa en 3D.

3.2.2. Solución 3: Base Giroscópica de Aluminio Ligero con Dos Anillos.

La base giroscópica construida en aluminio ligero fue una posible solución que está basada en la base giroscópica de diseño en impresión 3D. Esta solución consiste en usar anillos de aluminio en vez de anillos impresos en impresora 3D. Estos anillos, como el de la figura 3.7, están diseñados para ser mecanizados usando un cilindro curvador y una rebordecadora. En la figura 3.8 se puede observar con más detalle el rebordado de la tira de aluminio.

El anillo interior de este diseño tiene 54cm de radio exterior y 3mm de grosor. Este anillo tiene cuatro agujeros mecanizados donde se acoplarían dos rodamientos y dos anillos rozantes. El anillo exterior de 66cm y 3mm de grosor está unido al interior por dos varillas de aluminio. Estas varillas están soldadas al anillo exterior de manera que quedan fijas. Mediante el giro alrededor de las varillas el anillo interior puede girar con respecto al anillo exterior. Además, el anillo exterior está unido a una estructura metálica como la de la solución anterior. La unión entre anillo y estructura está formada por un rodamiento y un anillo rozante que están fijos en el anillo exterior. Posteriormente se sueldan dos varillas de aluminio a la estructura y al anillo exterior. Esta unión permite el giro alrededor del eje vertical de ambos anillos.

Esta solución ha sido descartada debido al precio de mecanizado para pocas unidades y al problema que el cambio de alguna pieza que esté soldada. Sin embargo, en el caso de la producción de una gran cantidad de bases giroscópicas esta solución sería la idónea.

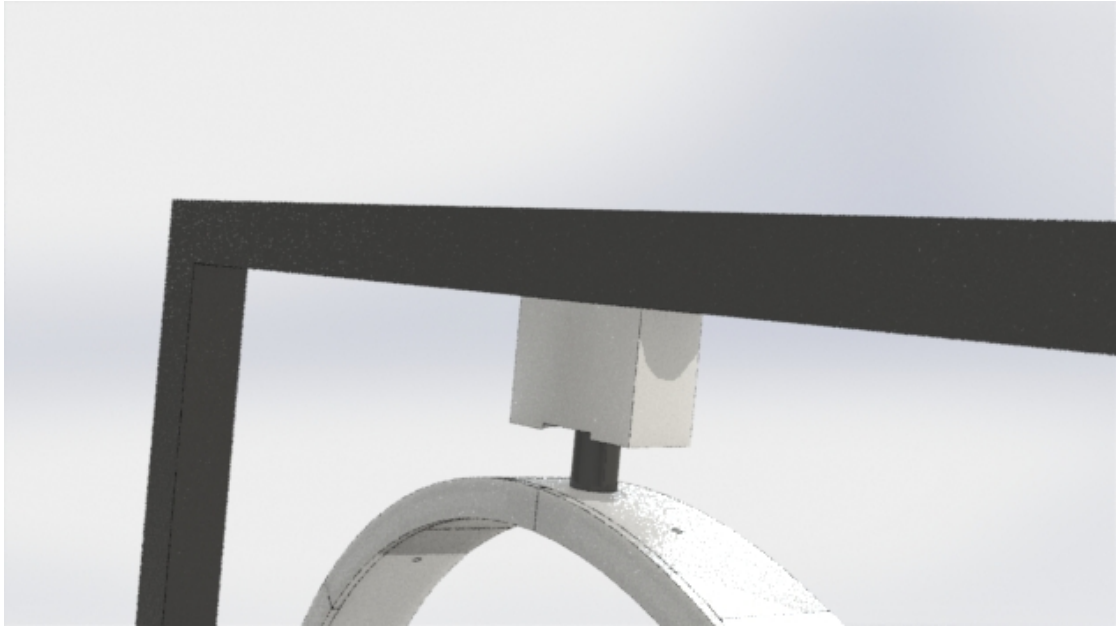


Figura 3.5: Detalle acople superior entre estructura metálica y anillo exterior en la base giroscópica de dos anillos impresa en 3D.

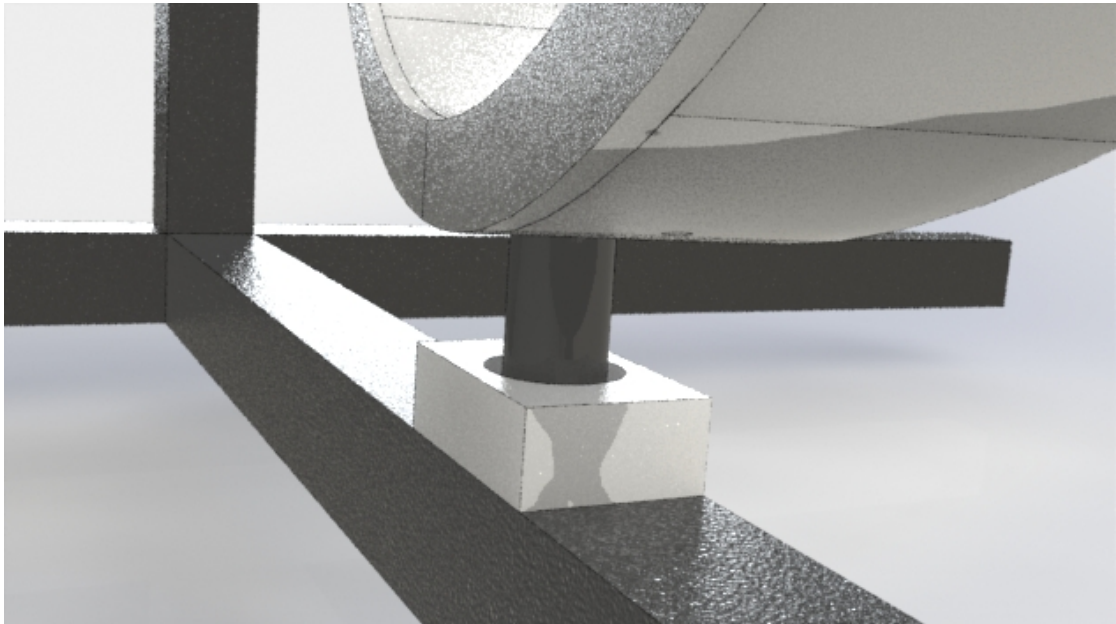


Figura 3.6: Detalle acople inferior entre estructura metálica y anillo exterior en la base giroscópica de dos anillos impresa en 3D.



Figura 3.7: Anillo interior de aluminio.

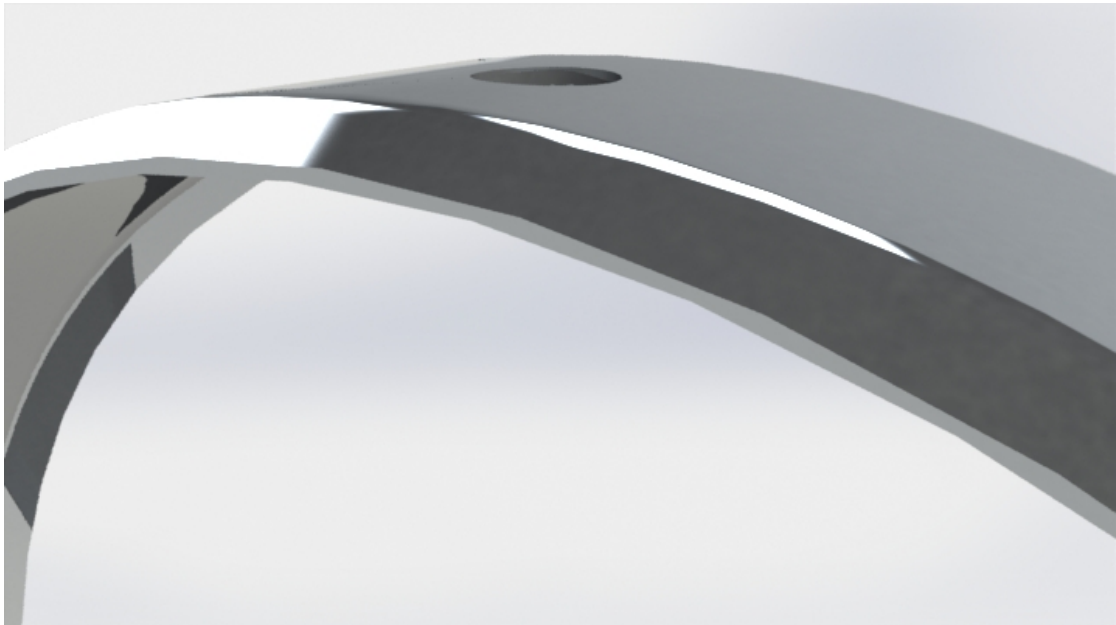


Figura 3.8: Detalle de rebordado del anillo interior de aluminio.

Capítulo 4

Solución Adoptada.

En este capítulo se comenta en profundidad la solución adoptada para este proyecto. La plataforma final es el resultado de proceso iterativo tanto en el diseño general, por ejemplo cambiando de dos anillos a uno, hasta el diseño de los detalles más pequeños, como ha ocurrido con el tamaño de la tornillería que se ha usado finalmente. Para poder entender por completo la solución adoptada, a lo largo de este capítulo se profundiza tanto en el diseño final como en las iteraciones que han llevado a ella.

El prototipo del proyecto ha sido diseñado para fabricarse usando el método de impresión 3D. Al usar este método se han podido fabricar distintos diseños de manera rápida y con un coste bajo. Esta sección describe el proceso de diseño que ha conseguido obtener la solución final.

Debido al tamaño máximo de impresión que permiten las impresoras que se han usado, uno de los mayores desafíos de este proyecto ha sido el diseño del anillo, cuyo diseño final se puede observar en la figura 4.21. Dado el tamaño del UAV para el que se ha diseñado la plataforma, la impresión del anillo en una sola pieza no es factible. Por esta razón, se han diseñado un conjunto de piezas que juntas forman un anillo de las dimensiones deseadas.

4.1. Diseño del cuadricóptero.

Dado el uso docente que se va a hacer de la plataforma, desde un principio se ha pretendido que sirviese para comprobar algoritmos de control de pequeños UAVs. Por ello, se decidió que albergase un UAV parecido al cuadricóptero de carreras ZMR250 que se puede ver en la figura 2.6a. El UAV diseñado consiste de un placa de 3mm de grosor diseñada para ser fabricada mediante una impresora 3D.

Para que el UAV sea lo más parecido al cuadricóptero que se ha mencionado anteriormente, la posición de los motores en la placa diseñada se encuentran a la misma distancia del centro que en el ZMR250. Por este motivo los motores forman un rectángulo

de $160 \times 205\text{mm}$. Sin embargo, como se puede ver en el capítulo 1 del documento planos, existen varias diferencias con respecto al cuadricóptero de referencia. En primer lugar el tamaño del cuerpo principal ha variado, este cambio está fomentado por la posición deseada de la placa electrónica. En segundo lugar el otro gran cambio, la eliminación de dos alturas en el cuerpo del UAV, se debe a que la rigidez que proporciona una segunda altura se la otorga la barra de aluminio a la cual está atornillada la placa en este proyecto.

Con la intención de que el modelo matemático de este UAV fuese lo más similar al ZMR250 posible se han usado unos motores de cuadricóptero de carreras. En este caso se han usado los motores (nombre) que juntos proporcionan una sustentación máxima de 1kg . En el documento de anexos se puede encontrar las especificaciones técnicas de este modelo de motores.



Package size: 83.5*81*53mm, Weight: $\approx 119\text{g}$ (Incl. package)

Figura 4.1: Motores utilizados en el UAV. (Imagen de <http://store-en.tmotor.com/goods.php?id=304>)

Dado el consumo de corriente de los cuatro motores del UAV se ha decidido usar una “placa de división de corriente” desde la cual se alimentan los motores y la placa electrónica por separado.

La placa electrónica seleccionada para este UAV es la placa “BeagleBone Blue”. Esta placa es un ordenador basado en el sistema operativo Linux y diseñado con fines de robótica. Los sensores y conectividad de esta placa la hacen ideal para un cuadricóptero como el que se ha diseñado. Uno de los sensores más útiles que contiene la placa es la IMU de 9 ejes. Esta unidad inercial está formada por un giroscopio, un magnetómetro y un acelerómetro. Además la placa está preparada para el control de 8 motores servo de 6V cada uno o 4 motores de corriente continua. Estas salidas la convierten en una placa

ideal para los motores que deseamos utilizar. La placa también incorpora conectividad Bluetooth 4.1 y Wifi 802.11. Esta conectividad permite incorporar los programas de control de manera inalámbrica. Este punto facilita mucho el uso de la plataforma ya que no hay que estar conectando un cable USB cada vez que se desea probar un algoritmo nuevo.

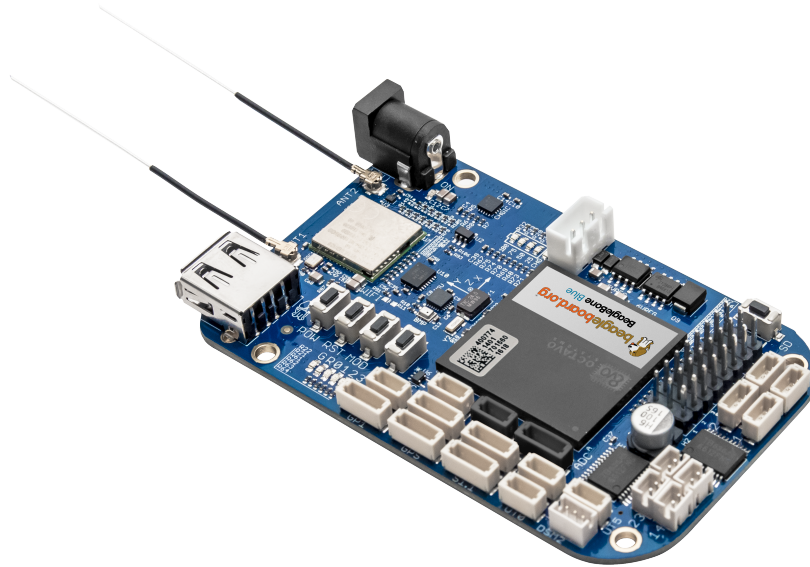


Figura 4.2: Placa electrónica “BeagleBone Blue”. (Imagen de <https://beagleboard.org/blue>)

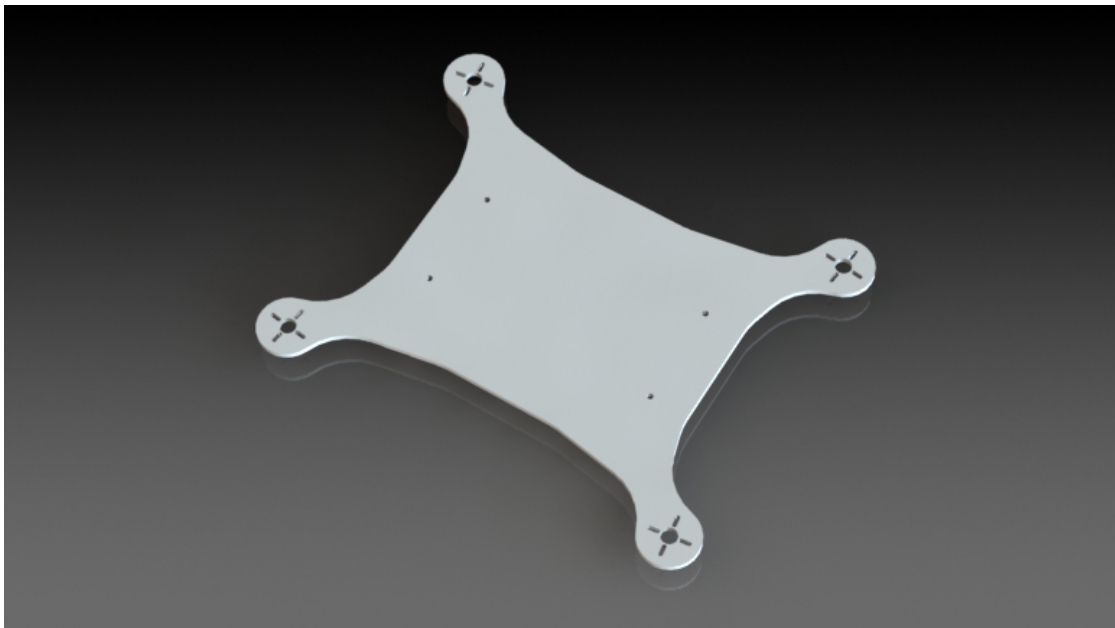


Figura 4.3: Imagen de la estructura del UAV.

4.2. Anillo.

Como se ha comentado anteriormente, por motivos de fabricación, el anillo que soporta el UAV se ha diseñado en distintas piezas. Dado que el anillo debe ser estructuralmente sólido y a la vez lo más ligero posible para poder cumplir su función, el diseño de las piezas resulta complejo. Por este motivo, partiendo desde un diseño inicial, se han realizado múltiples iteraciones en el diseño hasta obtener el resultado deseado. A lo largo de estas iteraciones se han tenido varios requerimientos en cuenta.

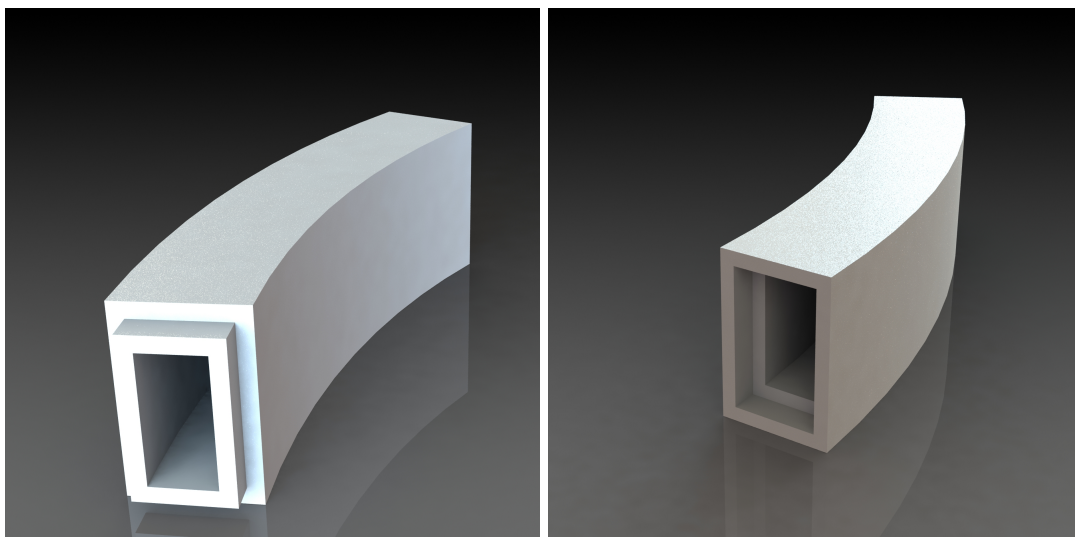
En primer lugar, las piezas deben poder imprimirse en la impresora del laboratorio en caso de que haya que reemplazar alguna de ellas. Por este motivo, todas ellas deben caber en un cubo de 20x20x20cm.

En segundo lugar, una forma de que el cableado esté seguro y no moleste al utilizar la plataforma es llevarlo por el interior de las piezas. Para poder llevar a cabo esta idea las piezas deben ser huecas.

Por último, para hacer más sólida la estructura y más fácil el montaje las piezas deben ser del mayor tamaño posible. Por lo que la placa de impresión debe ser optimizada al máximo posible.

4.2.1. Diseños iniciales.

El primer diseño que se realizó fue un anillo de ocho piezas. Cada pieza contenía un extremo macho y otro extremo hembra, tal y como se ve en la figura 4.4.



(a) Primera pieza diseñada parte macho.

(b) Primera pieza diseñada parte hembra.

Figura 4.4: Primera pieza diseñada.

Las paredes de este primer diseño contaban con 1cm de grosor y la pieza en si con 4cm. Debido al gran voladizo, 2cm a lo ancho, esta pieza presenta mucha dificultad al

fabricarse mediante impresión 3D como se puede apreciar en la figura 4.5. Por estos motivos se desechó este diseño.

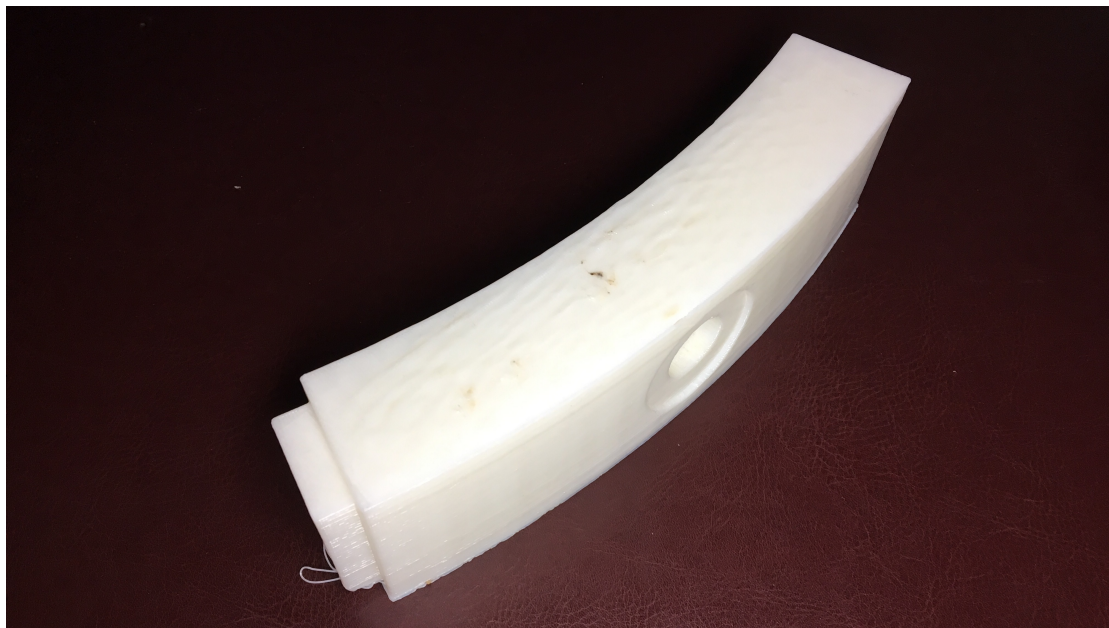


Figura 4.5: Foto de la primera pieza diseñada.

Para evitar los errores en la fabricación que se habían cometido en la primera pieza el diseño se modificó. Observando la primera pieza se dedujo que se debía realizar un diseño más ligero y en el cual los errores de voladizo no afectasen a las uniones.

Por estos motivos, en primer lugar, se redujo el espesor de la pieza a la mitad. Las paredes de la pieza cambiaron a ser de 5mm de espesor y el voladizo de 1cm de ancho.

En segundo lugar, se cambió el método de unión de las piezas. Se reemplazó por unas uniones macho-hembra que no contuviesen ningún tipo de voladizo. Estas modificaciones se pueden observar en las figuras 4.6 y 4.7. Tal y como se observa en las figuras, siendo ambas la misma pieza, si se crea otra pieza espejo se puede acabar formando un anillo que contiene al UAV que se ha diseñado, como el de la figura 4.8.

En este caso, el mayor problema de la pieza se volvió a ver en el voladizo entre los extremos de cada pieza. Este fallo en la fabricación dotaba a la pieza de grandes fallos estructurales. Además, las paredes de las uniones, al ser tan finas y cortas, también sufrieron fallos en la fabricación haciendo la unión entre piezas un punto demasiado endeble en la estructura. Esta solución resultó demasiado frágil como para poder llevarla a cabo como se puede ver en la figura 4.9.

Aprendiendo de los diseños anteriores se creó el tercer y último diseño antes del diseño final. Este diseño ha sido brevemente explicado en la sección 3.2.1. A continuación se explica en más detalle el diseño de las piezas que forman los anillos de esa solución.

Observando los problemas que conlleva cualquier diseño con un gran voladizo en

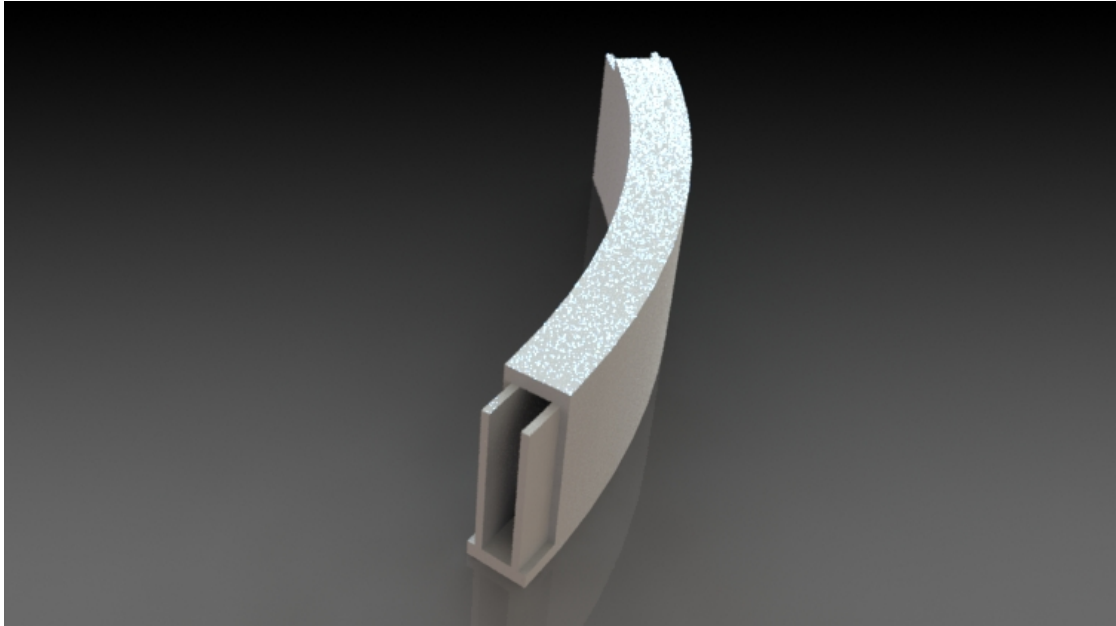


Figura 4.6: Segunda pieza diseñada parte macho.

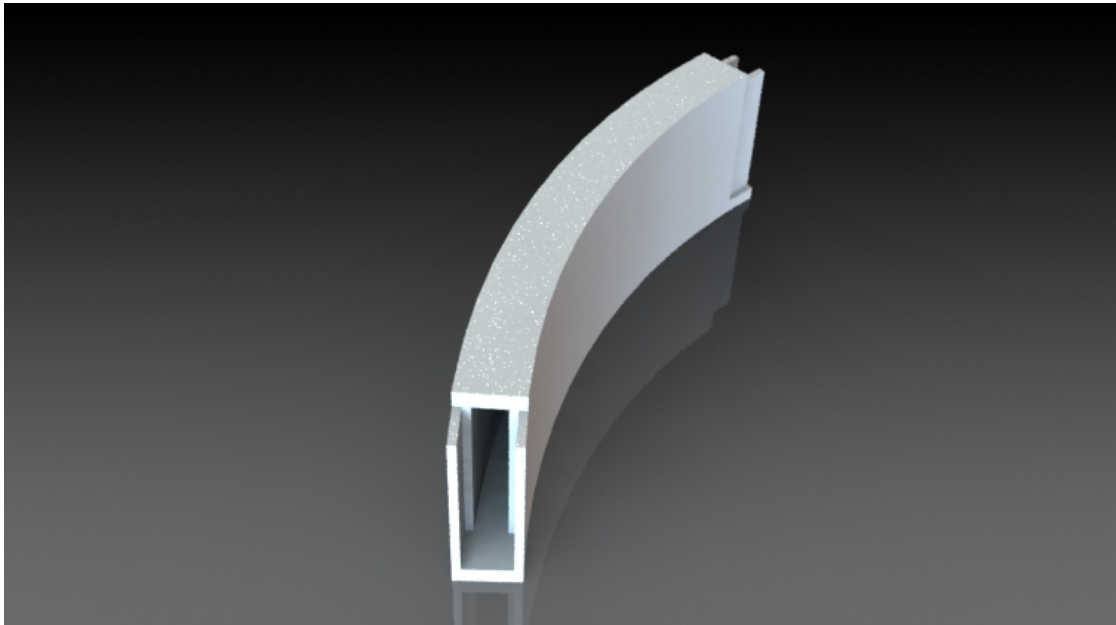


Figura 4.7: Segunda pieza diseñada parte hembra.

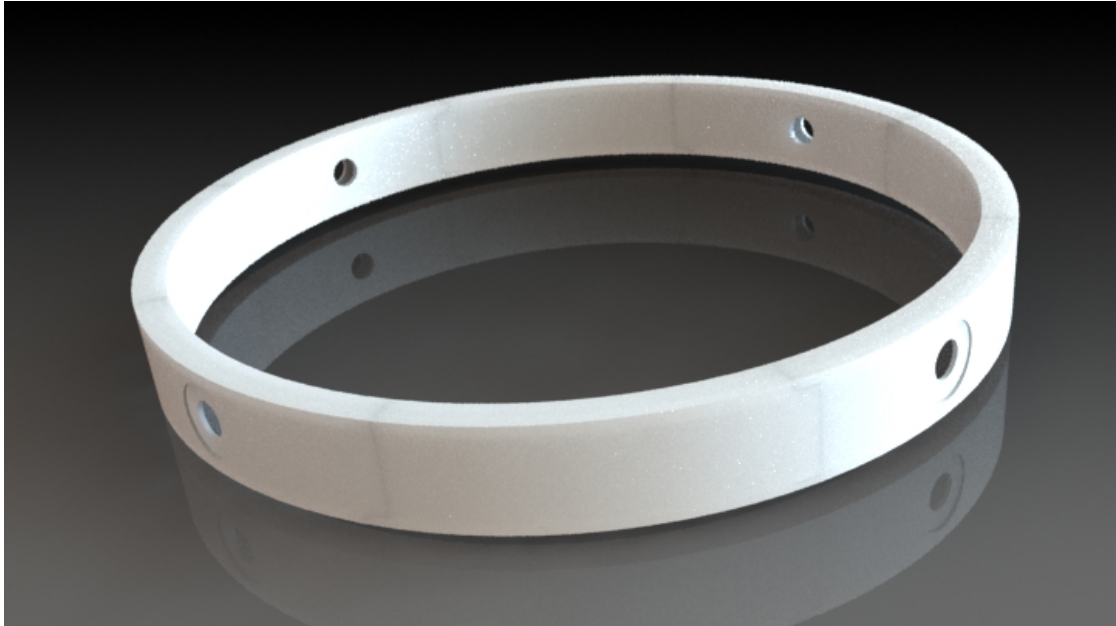


Figura 4.8: Anillo formado por las piezas del segundo diseño.

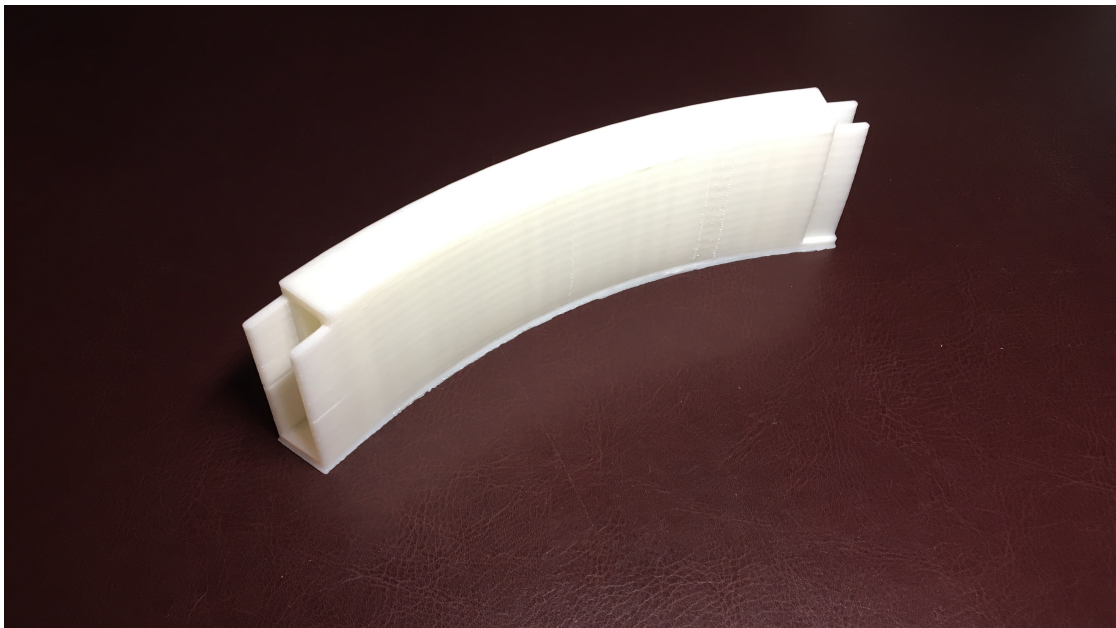


Figura 4.9: Foto de la segunda pieza diseñada.

fabricación mediante impresión 3D se decidió eliminar este problema de la estructura. Se crearon dos familias de piezas, unas macho y otras hembra, como se pueden observar en las figuras 3.1 y 3.2. Al dividir las piezas de esta manera el anillo cambió de estar formado por ocho piezas a estar formado por dieciséis piezas. Este cambio permitió eliminar todos los fallos estructurales que sufrían los primeros diseños en las impresiones ya que todas las piezas se podían imprimir con una base en el suelo y sin ningún voladizo. Además, al acoplar las piezas macho y hembra se pueden posicionar con un desfase de manera que la unión entre piezas es mucho más sólida que en las anteriores soluciones, tal y como se puede ver en la figura 4.10. Este desfase está marcado por los agujeros de 3mm que existen en el medio de todas las piezas. Estos agujeros además permiten atornillar las piezas macho con las piezas hembra. Debido a su rigidez estructural se pudo reducir el espesor de esta solución a 2cm.

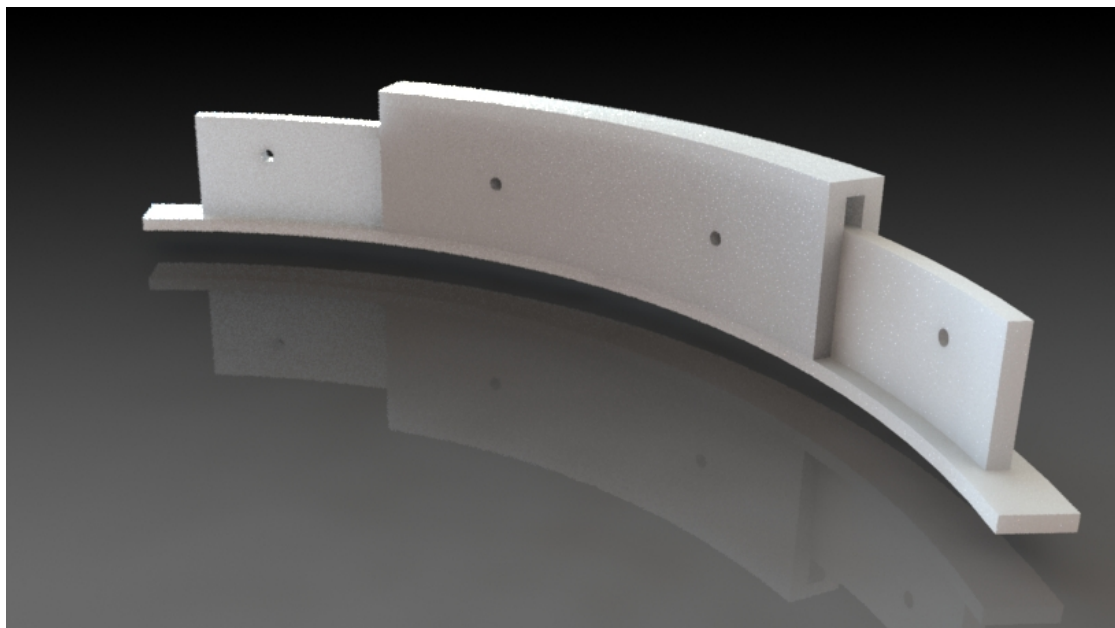


Figura 4.10: Acople que forman las piezas del tercer diseño.

Además, como se puede observar en la figura 4.10 todas las piezas macho están diseñadas con un pequeño rebaje en la pared central a un lado o al otro. Este rebaje de 5° permite que se puedan acoplar elementos externos al anillo cada 90° sin que las piezas macho interfieran. Este detalle se puede observar en la figura 4.11.

En este caso no hubo ningún fallo en la fabricación del anillo por la que se descartase este diseño. Sin embargo, una vez realizados los tests estructurales que se verán en el capítulo 5 se decidió que el anillo podía y debía reducirse de tamaño. Esta decisión no solo se tomó por reducir el peso de la estructura si no también porque el diseño final resultaba demasiado grande para el espacio del que se dispone en los laboratorios.

Mediante la producción de todos estos diseños, la estructura se fue mejorando paso a paso hasta llegar a la solución que se ha usado para este proyecto.

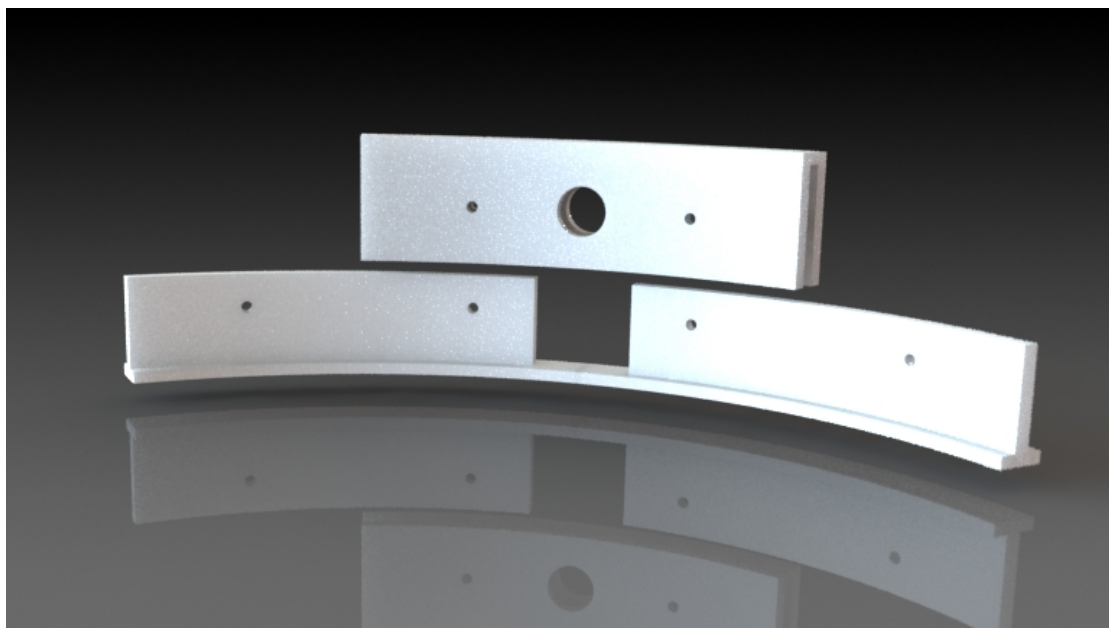


Figura 4.11: Vista explosionada de un acople donde se puede introducir un elemento externo.

4.2.2. Diseño final.

Las piezas del diseño final del anillo están basadas en el último diseño que se ha comentado. Esto significa que el anillo está formado por dieciséis piezas, ocho de ellas macho y las otras ocho hembra, de 45° cada una. Una vez realizados los análisis estructurales se realizaron distintas pruebas de impresión para comprobar cual sería la máxima reducción posible. En este caso se concluyó que el espesor mínimo de las piezas debía ser 1,25cm. Además, también se redujo la altura de las piezas ya que como se comentará posteriormente también se cambió el cableado del diseño para poder reducir el tamaño del anillo. Este cambio redujo la altura de las piezas de 6cm a 5cm. Por último, se decidió cambiar también reducir en 5cm el diámetro del diseño, de 50cm a 45cm.

Dentro de las dos familias de piezas existen distintos tipos. En la familia de las piezas macho existen 4 modelos distintos y en la familia de las piezas hembra existen 3 modelos distintos.

Dentro de la familia de los machos existen dos modelos con un rebaje de 5° en la sección central a la derecha y otros dos modelos con un rebaje en la sección central de 5° a la izquierda tal y como ocurre con el anterior diseño. Sin embargo, en este caso uno de los modelos con el rebaje a la izquierda y otro con el rebaje a la derecha tienen además una ligera muesca circular en la base. Estas muescas se pueden apreciar en las figuras 4.12 y 4.13. Estas pequeñas muescas circulares son necesarias para poder acoplar los stators de los anillos rozantes en el centro de la pieza hembra, tal y como se ve en la figura 4.18 y en la figura del ensamblaje final.

Los modelos de las piezas macho que no son usados en las uniones con los stators de

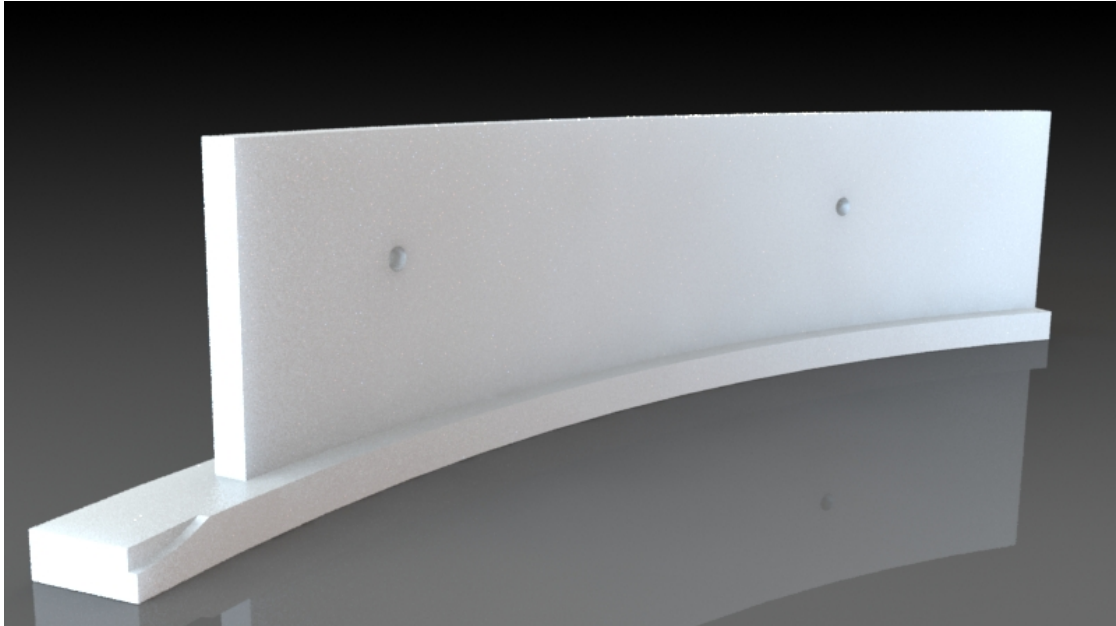


Figura 4.12: Pieza macho con muesca para acoplar el anillo rozante a la izquierda.

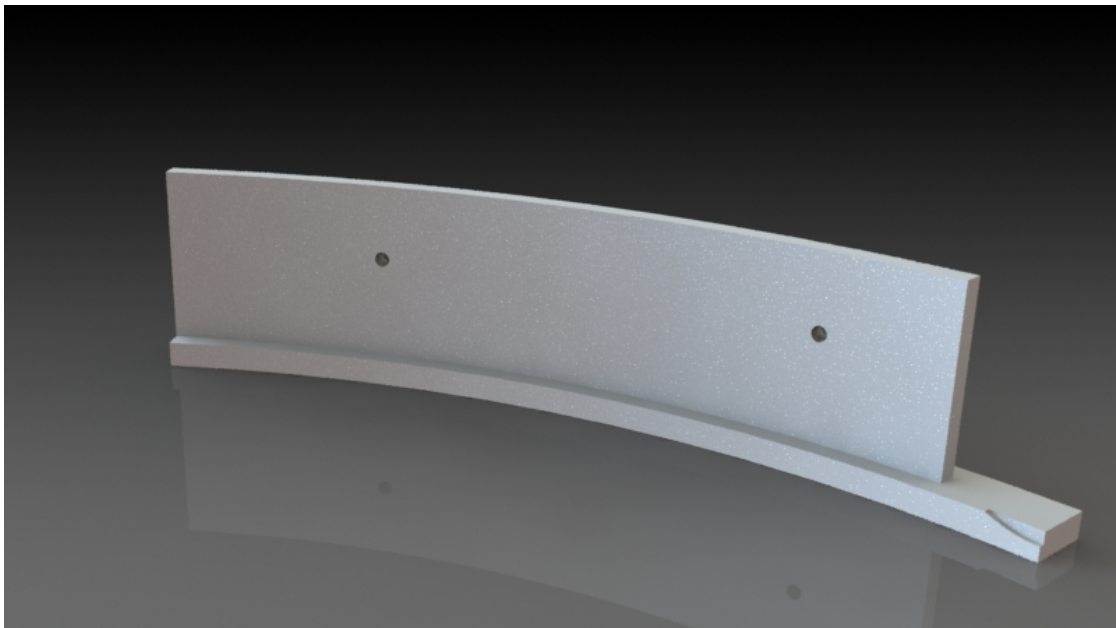


Figura 4.13: Pieza macho con muesca para acoplar el anillo rozante a la derecha.

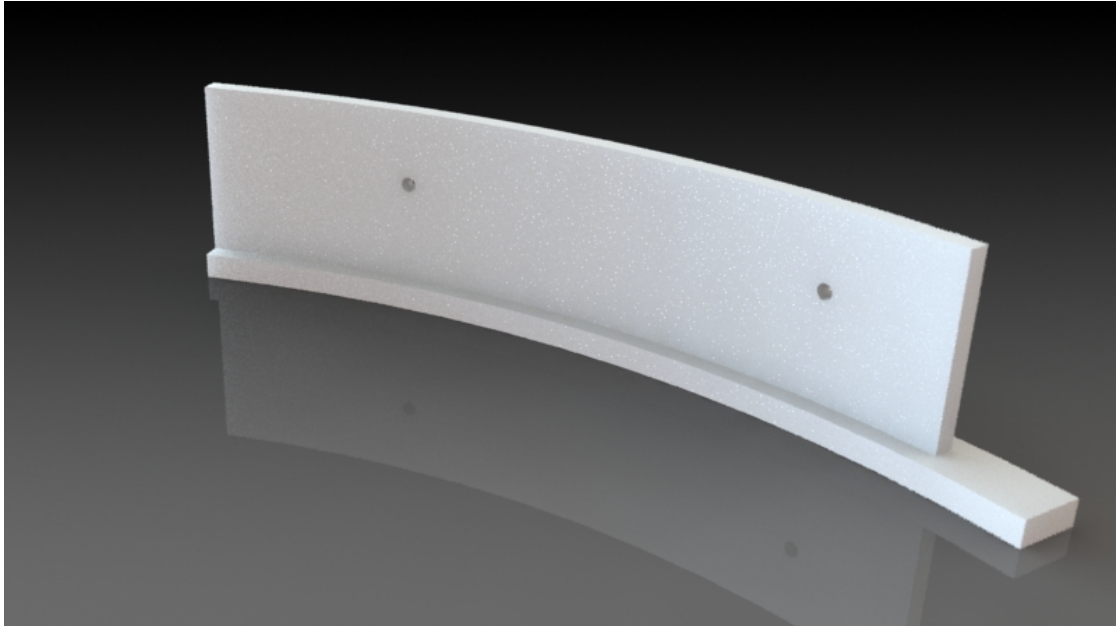


Figura 4.14: Pieza macho con rebaje a la derecha.

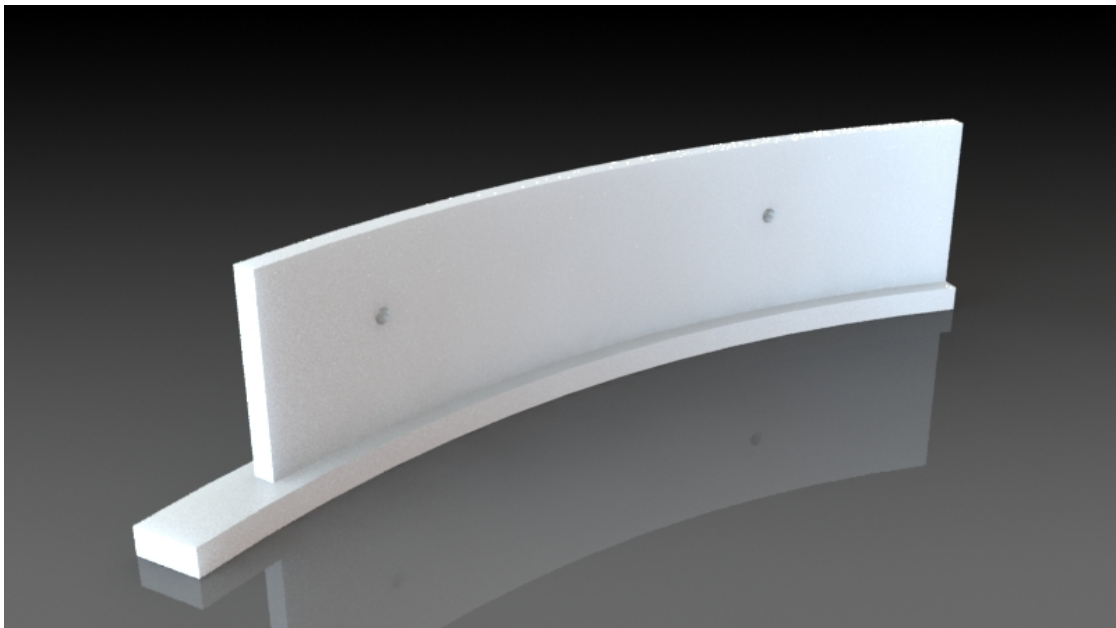


Figura 4.15: Pieza macho con rebaje a la izquierda.

los anillos rozantes no sufren las muescas características. Este tipo de piezas se pueden ver en las figuras 4.15 y 4.14. Estas piezas son usadas en el resto del anillo incluyendo los tramos donde se debe acoplar el rotor de un anillo rozante.

Como se ha comentado anteriormente existen tres tipos de piezas hembra en el anillo. Dado que el anillo tendrá cuatro puntos de anclaje, dos con la barra de aluminio que sujeta al UAV y otros dos con los soportes verticales, habrá cuatro piezas que no necesiten acoplar ningún elemento externo. Estas piezas serán completamente lisas exceptuando los agujeros que serán usados para alinear y fijar las piezas hembra con las piezas macho, tal y como se puede observar en la figura 4.16.

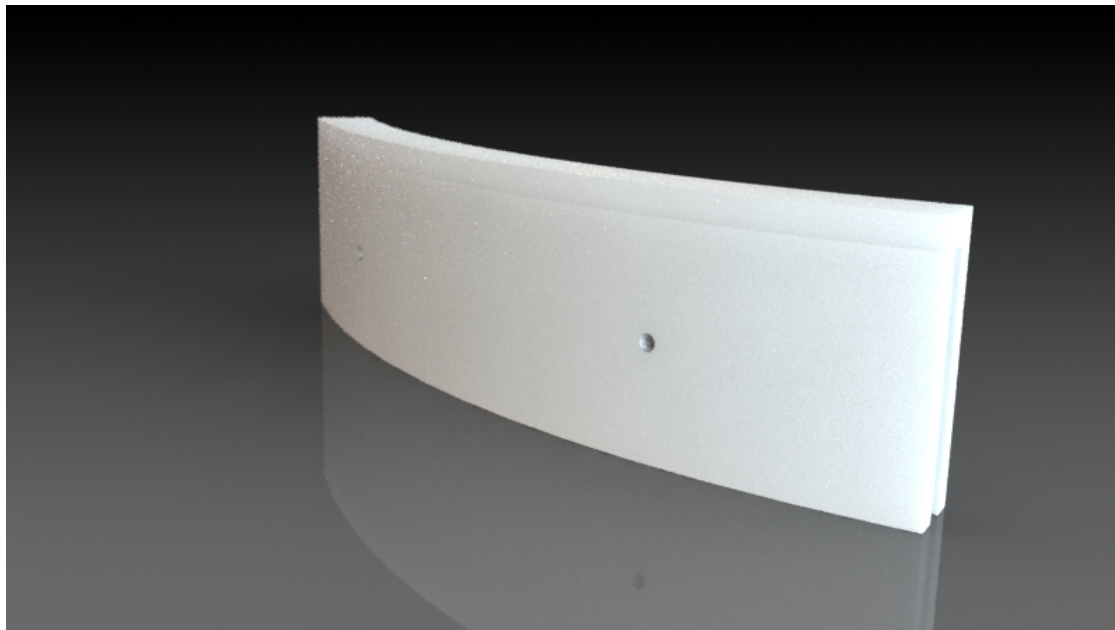


Figura 4.16: Pieza hembra lisa.

El segundo tipo de pieza hembra del anillo es la pieza que permite acoplar el stator del anillo rozante 2, cuyas especificaciones están disponibles en el documento anexos. Esta pieza permite introducir el stator del anillo de tal manera que se pueda atornillar a la cara interior de la misma. Dos piezas de este tipo son necesarias para poder sujetar la barra a la que está atornillada el dron. Esta pieza se puede ver con más detenimiento en la figura 4.17. Se puede observar como se acopla el anillo rozante a la pieza en la figura 4.18.

Finalmente, el tercer tipo de pieza hembra es la pieza que permite acoplar el anillo a los soportes verticales. La unión entre el anillo y los soportes verticales se genera al acoplar el rotor del anillo rozante 1 al agujero del centro de la pieza. Este agujero se puede observar en la figura 4.19. La unión entre el anillo rozante y la pieza es por presión por lo que se facilita el montaje y el desmontaje en caso de rotura de alguna pieza. En la figura 4.20 se puede observar como acoplan los dos elementos previamente mencionados.

Una vez fabricadas todas las piezas se colocan y atornillan los dos stators de los anillos rozantes 2 a las piezas hembra correspondientes. Posteriormente se acopla por

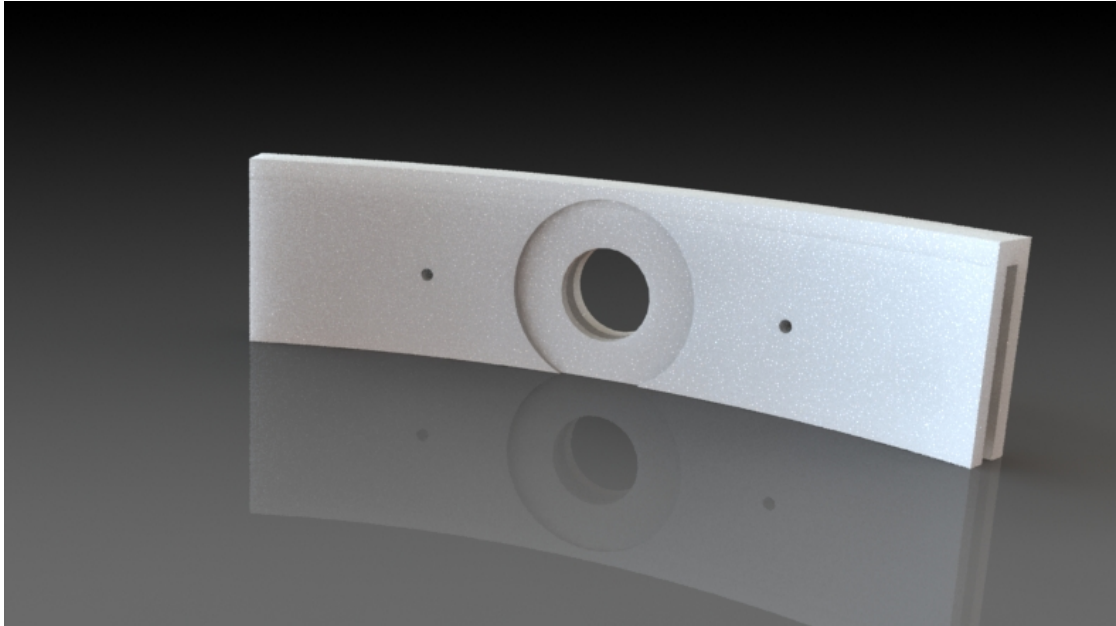


Figura 4.17: Pieza hembra que permite acoplar el stator del anillo rozante 2.

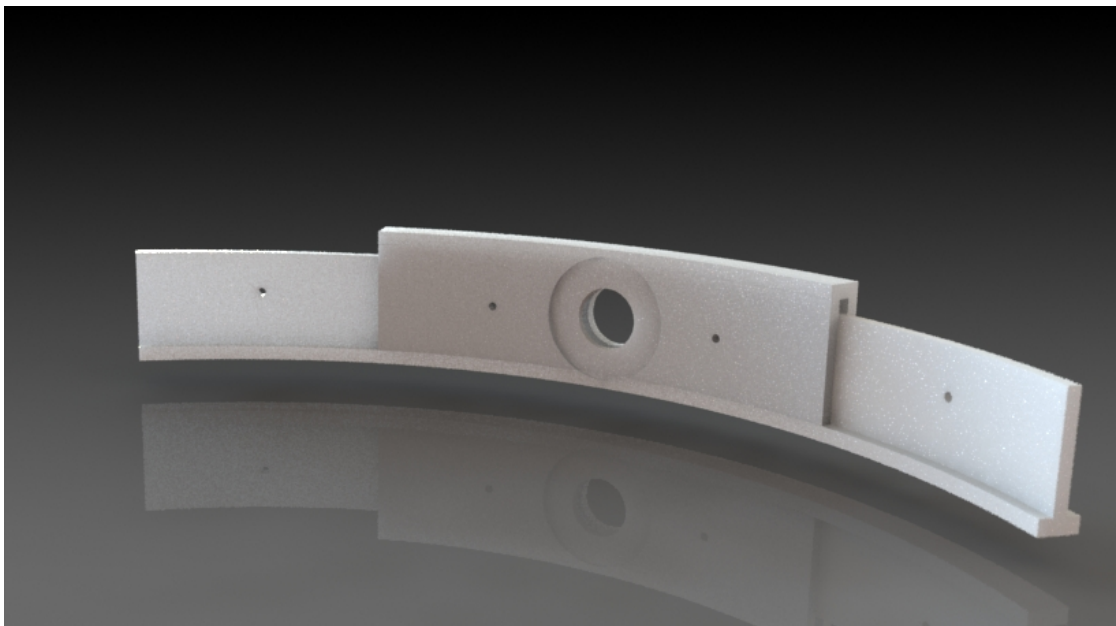


Figura 4.18: Ensamblaje final de las piezas que acoplan el anillo rozante 2.

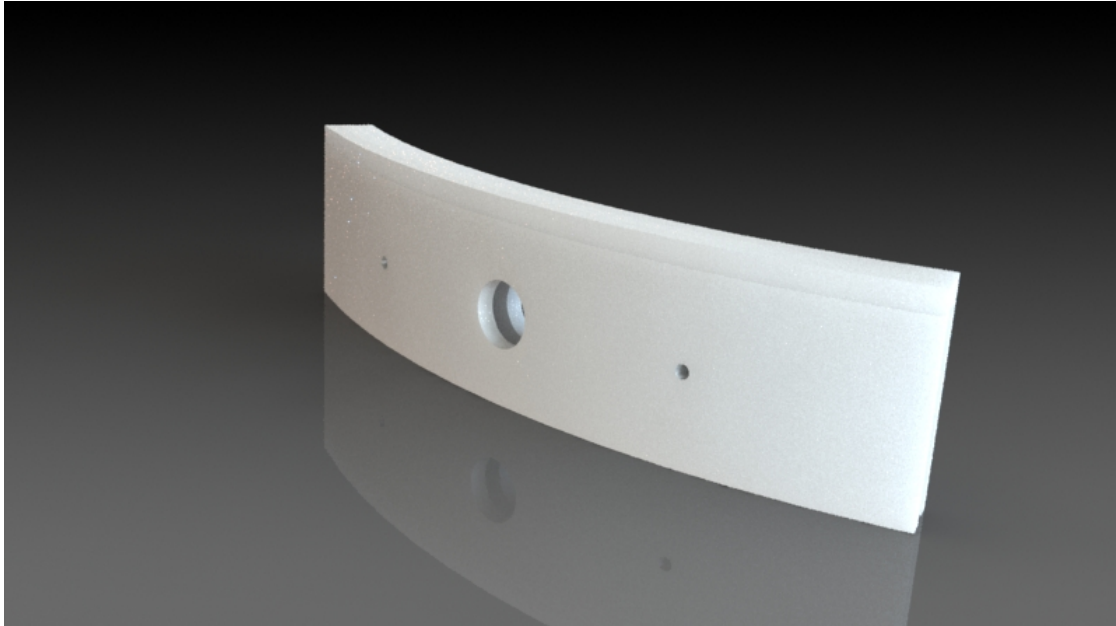


Figura 4.19: Pieza hembra que acopla el rotor del anillo rozante 1.

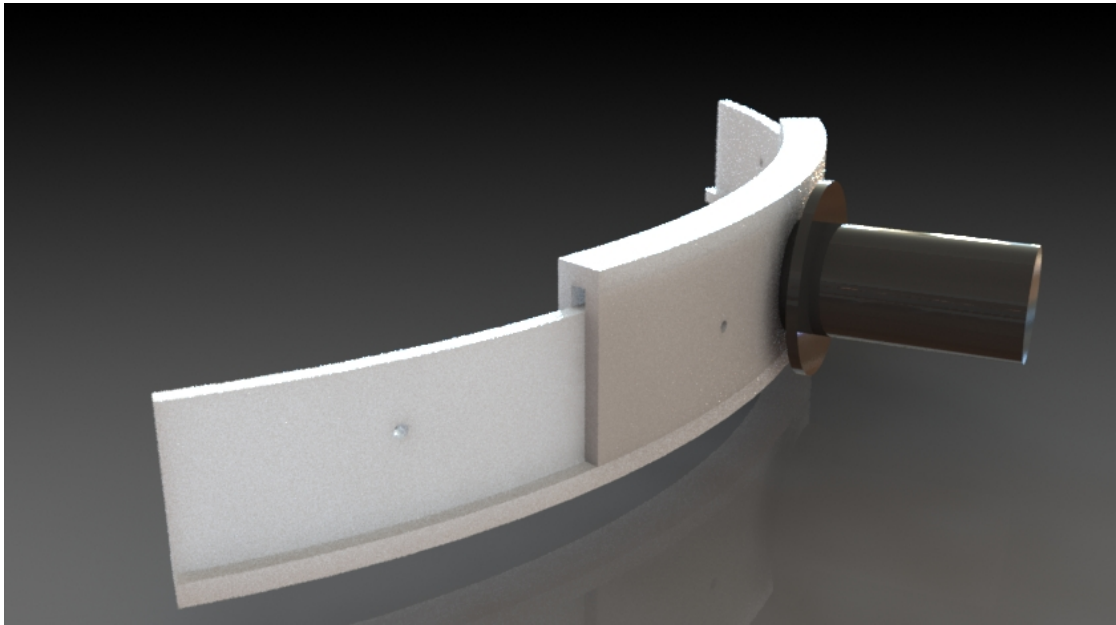


Figura 4.20: Ensamblaje entre el rotor del anillo rozante 1 y el anillo.

presión el tubo de aluminio al cual está atornillado el UAV. En este caso, previamente se ha agujereado el tubo para poder sacar los cables de los anillos rozantes a la altura del UAV. Una vez ajustado el tubo a los anillos rozantes se van colocando las piezas macho y hembra con un desfase de 22.5° entre ellas. A 90° de los primeros anillos rozantes se colocan las piezas que acoplan el rotor del anillo rozante 1. Una vez colocadas todas las piezas se atornillan las piezas macho y hembra usando los agujeros de 3mm que hay a lo largo de la línea media del anillo. Este montaje se puede observar en la figura 4.21. Al estar el tubo de aluminio conectado a dos anillos rozantes el UAV puede girar a lo largo de su eje longitudinal, movimiento de alabeo, por lo que el anillo le da al UAV su primer grado de libertad.

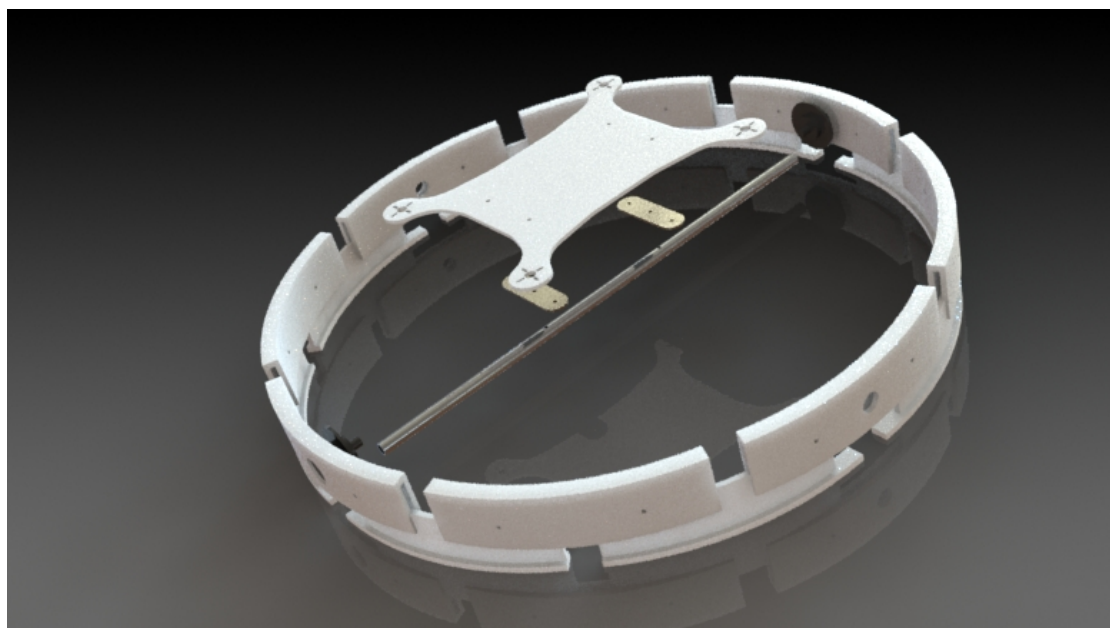


Figura 4.21: Ensamblaje del anillo.

4.3. Soporte del anillo.

Para sujetar el anillo a la base se ha optado por un conjunto de piezas metálicas y piezas impresas en 3D. Los anillos rozantes cuyos rotores están acoplados al anillo están sujetos mediante unos ensamblajes de piezas impresas en 3D.

Estos ensamblajes están especialmente diseñados para acoplar al anillo rozante y a su vez poder unirse a las piezas metálicas que soportan la estructura. Las piezas que forman el ensamblaje están diseñadas de forma que no exista ningún elemento en voladizo al imprimirlas. Estas piezas, que se pueden ver en las figuras 4.22 y 4.23 contienen varias cavidades. Las dos más importantes son las que abrazan al anillo rozante y a la estructura metálica. Esta última cavidad se ha elegido rectangular para evitar cualquier posibilidad de movimiento relativo. En la figura 4.24 se puede observar como sería el montaje de estas piezas junto con el anillo rozante 1. Una vez en posición ambas piezas se pueden atornillar entre sí mediante los tres agujeros pasantes que se ven en las figuras.

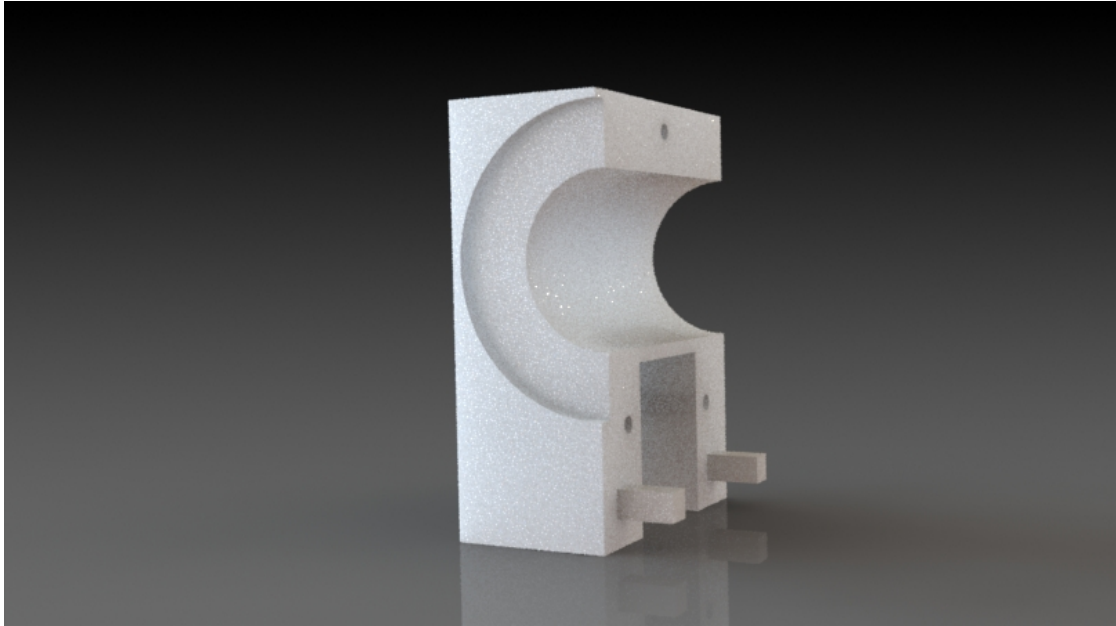


Figura 4.22: Pieza macho que acopla el anillo rozante 1.

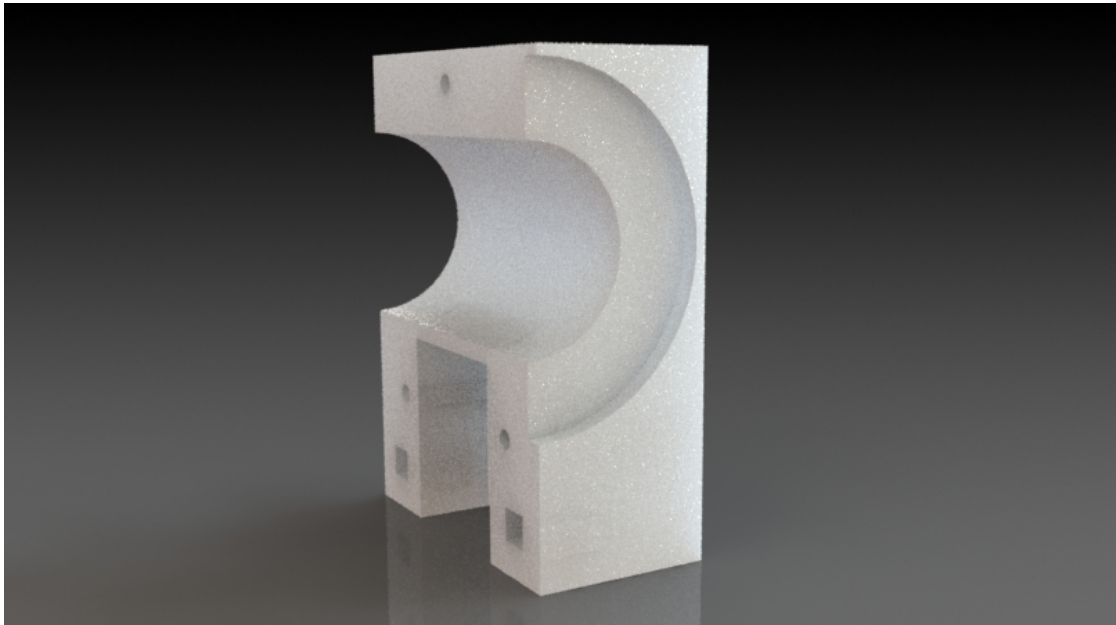


Figura 4.23: Pieza hembra que acopla el anillo rozante 1.

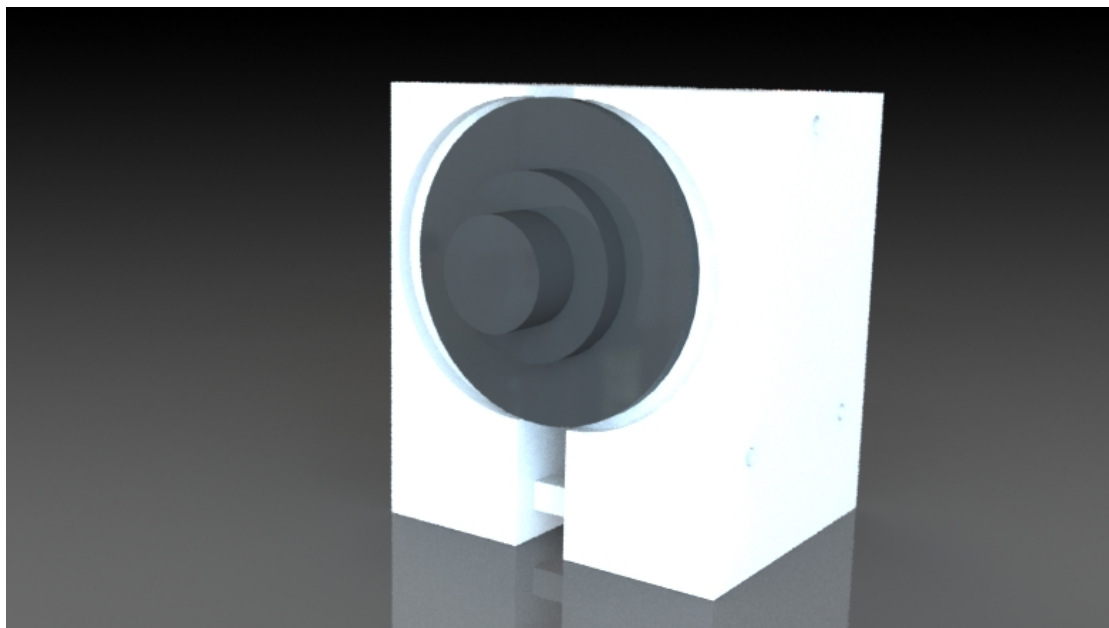


Figura 4.24: Ensamblaje explosionado de las piezas que abrazan al anillo rozante 1.

Para elevar el anillo a una posición en la cual no golpee contra la base se han fabricado dos soportes metálicos. Estas columnas metálicas de 40cm de altura y sección cuadrada son acopladas a las piezas de las figuras 4.22 y 4.23 por su orificio inferior. Una vez ensambladas son atornilladas a la base mediante los agujeros que existen en la base que podemos ver en la figura 4.25. Estas piezas metálicas son fabricadas mediante el corte de un tubo cuadrado de 25x25mm de sección y soldado en uno de sus extremos a lamina cuadrada de 2mm de grosor y sección de 5x5cm.

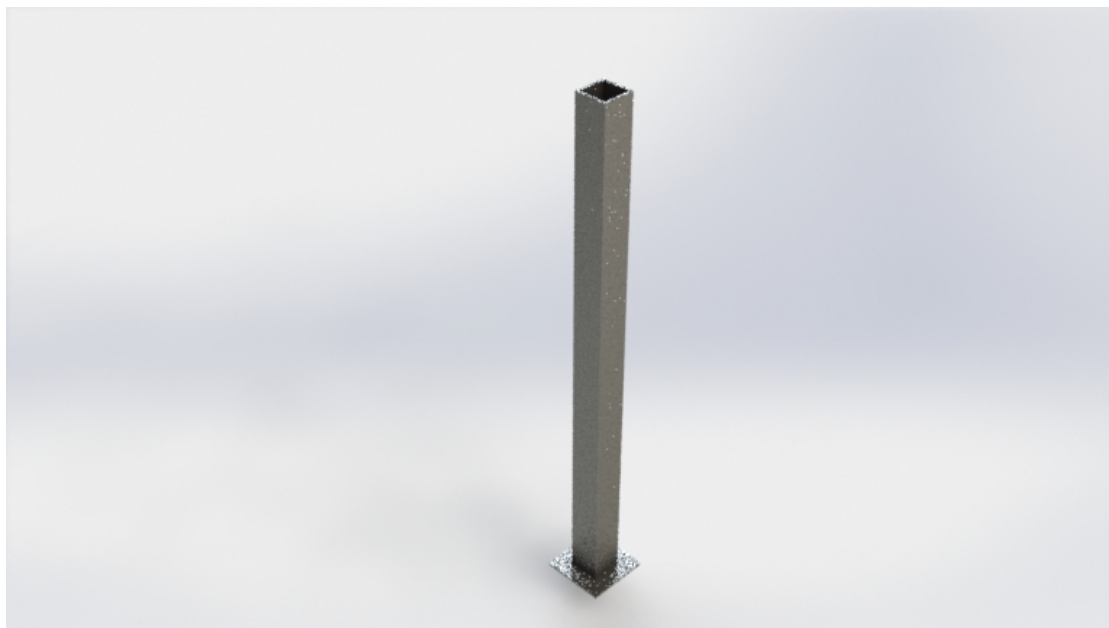


Figura 4.25: Columna de hierro.

La mejor manera de montar esta sección de la estructura es abrazando al mismo tiempo el anillo rozante y la columna metálica. Una vez abrazadas y encajada la pieza

macho con la pieza hembra se atornillan ambas piezas y la columna metálica y el anillo rozante quedan fijos por la presión ejercida sobre ellos. Además, en caso de ser necesario se puede atornillar el anillo rozante a los cubos de ABS para poder fijarlo mejor. En la figura 4.26 se puede observar el montaje del soporte del anillo.

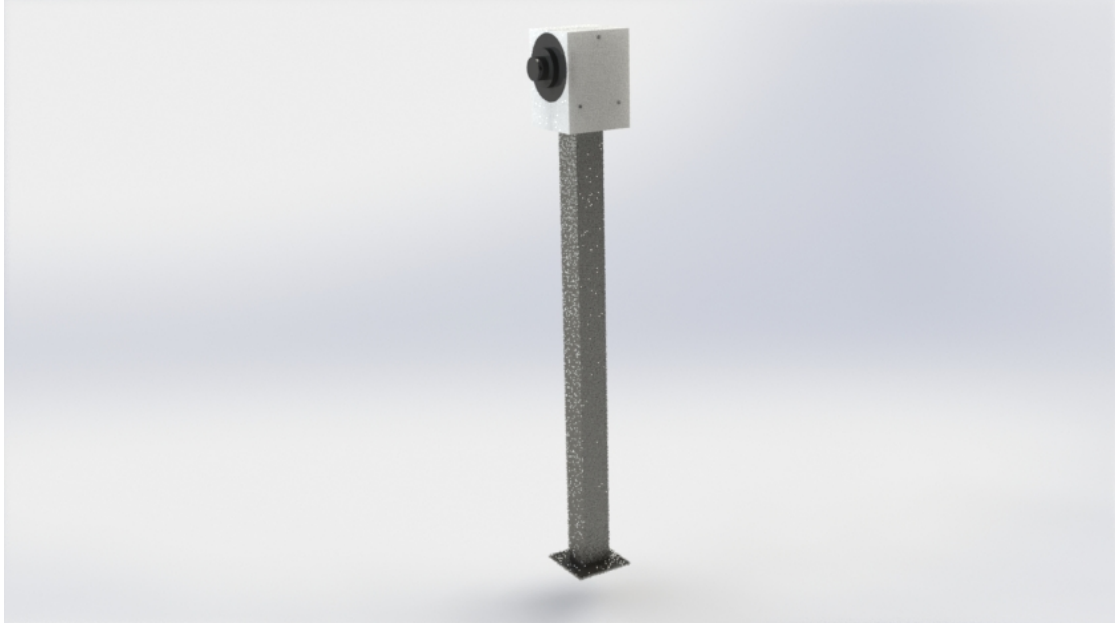


Figura 4.26: Ensamblaje de piezas que soportan el anillo.

El giro del anillo estos soportes es esencial para la base ya que otorga al UAV su movimiento de cabeceo y por lo tanto su segundo grado de libertad.

4.4. Base.

Para que el UAV pueda realizar el movimiento de guiñada se ha fabricado una base circular de madera de 62cm de diámetro y 1cm de espesor. Como se ha comentado anteriormente, a esta base se fijan mediante tornillos los dos soportes que elevan el anillo.

Por la parte inferior de la base se atornilla también un rodamiento circular de aluminio. Este rodamiento permite el movimiento relativo de la base con respecto al suelo. Además como se puede observar en la figura 4.27 el centro de la base contiene un agujero donde se atornilla el stator de un anillo rozante del tipo 1.

Esta parte de la estructura es clave ya que otorga al sistema su tercer grado de libertad.

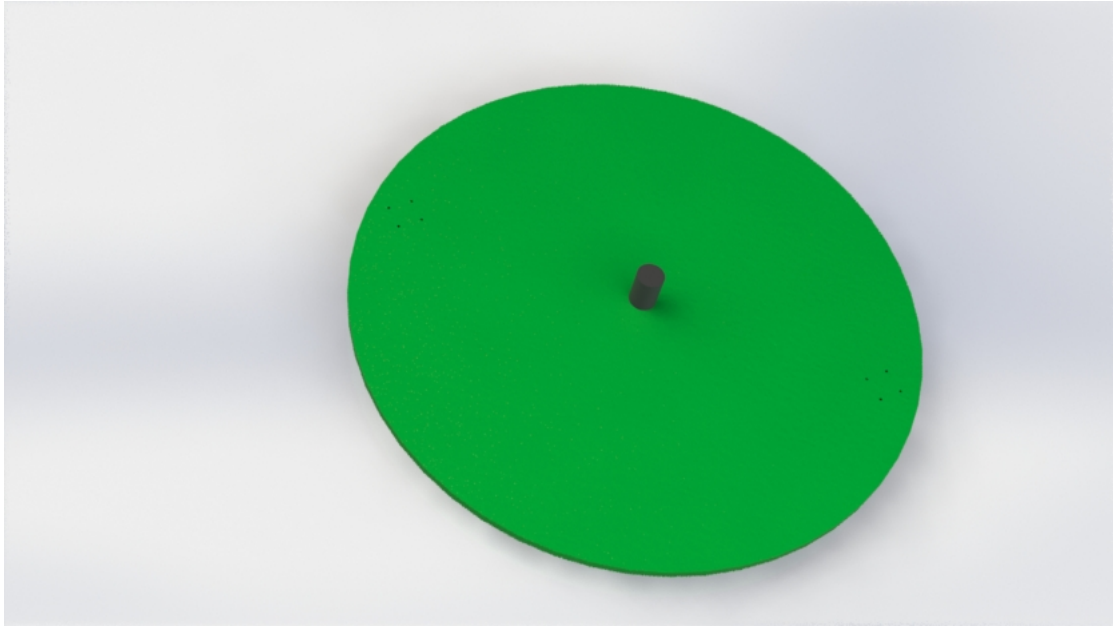


Figura 4.27: Base circular de la estructura.

4.5. Alimentación de la base giroscópica.

En varios puntos de la estructura se han colocado anillos rozantes. Estas piezas no solo permiten el giro del UAV alrededor de dos de sus tres ejes si no que también permiten el paso de la corriente a través de ellos. Al usar los anillos rozantes a lo largo de toda la estructura se puede alimentar el UAV sin el uso de baterías. Este punto es muy útil ya que permite el uso continuo de la base giroscópica sin necesidad de cambiar ningún tipo de baterías.

Debido a las diferencias de tamaño se han usado dos tipos de anillos rozantes tal y como se ha comentado anteriormente en la sección 2.5. Los anillos del tipo 1 se han usado en la base circular y en los soportes. Estos anillos rozantes permiten la circulación de electricidad en los movimientos de guiñada y cabeceo respectivamente. Además, en la unión entre el anillo circular y el tubo de aluminio se han usado dos anillos rozantes del tipo 2.

El uso de anillos rozantes es clave en este diseño ya que no solo permiten alimentar al UAV si no que también permiten los movimientos de cabeceo y de alabeo.

4.6. Montaje de la estructura completa.

Una vez diseñadas las distintas secciones se deben montar entre si para formar la estructura completa.

En primer lugar, una vez está el anillo montado como se ha explicado anteriormente se debe conectar a los dos soportes. El montaje de estas secciones es sencillo ya que el

rotor del anillo rozante que está expuesto en los soportes se puede acoplar por presión a las piezas hembra de la figura 4.19.

En segundo lugar, se debe atornillar el rodamiento de aluminio a la base circular de madera.

Finalmente, una los soportes están unidos al anillo se atornilla la base de las mismas a la base circular de madera por los agujeros diseñados. La posición exacta de los agujeros se puede ver en el plano 12 del documento planos.

Una vez montada toda la estructura su apariencia se asemeja a la de la figura 4.28. A lo largo de este montaje es esencial que el UAV quede en el centro del anillo y que tanto el anillo como el rodamiento de la base circular sean concéntricos entre si. Este punto es clave para que el UAV experimente movimientos de giro puro, si cualquiera de las condiciones anteriores no se cumple el UAV experimentará un movimiento de giro más traslación.

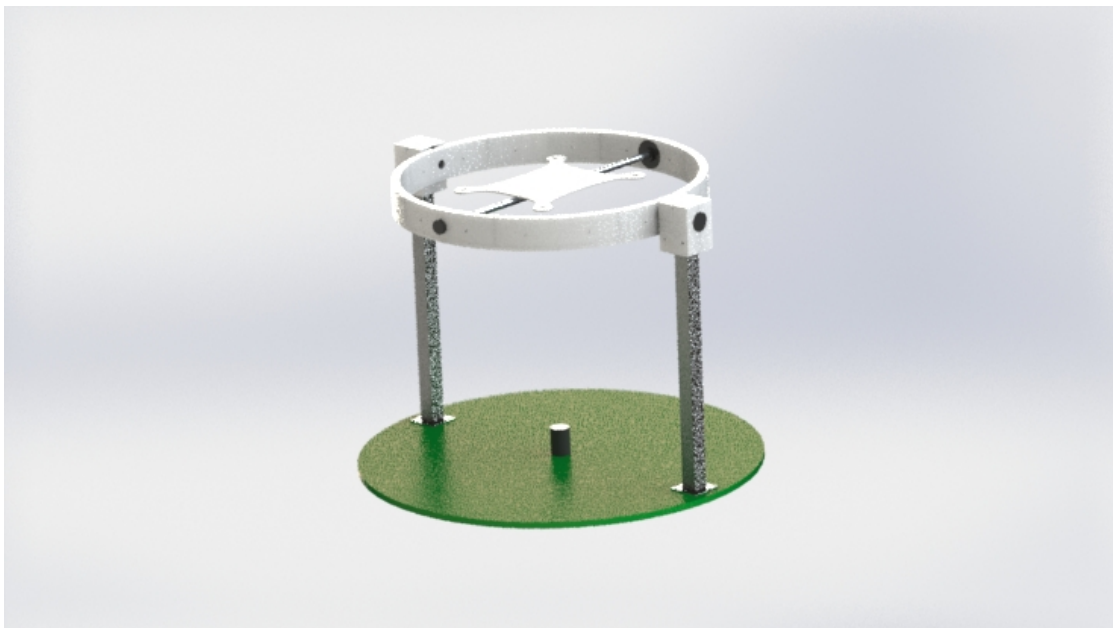


Figura 4.28: Ensamblaje final.

Capítulo 5

Tests y Resultados.

A lo largo de este proyecto se han realizado diversos tests y análisis tanto de resistencia estructural como de funcionamiento. A continuación se comentarán en profundidad dichos análisis.

5.1. Tests de resistencia, método de elementos finitos

Para poder optimizar el diseño de la estructura que se ha diseñado, se han realizado análisis estructurales a distintas secciones de la misma para poder obtener una primera aproximación de la respuesta estructural que se obtendría al someterse a las cargas que genera el UAV que alberga la plataforma. Estos análisis han sido realizadas mediante el software SolidWorks.

Las subsecciones que se presentan a continuación analizan los tests estructurales a los que se han sometido la estructura del UAV, al anillo giroscópico y las piezas de acople entre el anillo y las columnas metálicas. Todas estas secciones han sido sometidas a la carga que produciría el UAV a máxima potencia ascensional. Dado que es un primer análisis estructural que se ha corroborado posteriormente mediante ensayos reales, una vez fabricada toda la estructura, se decidió simular todas las estructuras en estático, para poder simplificar el análisis. Las condiciones del estudio se pueden ver en la tabla 5.1

Además, las propiedades del material en el que se fabrican las piezas se pueden ver en la tablar 5.2

Tabla 5.1: Condiciones de todos los análisis de elementos finitos realizados

Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Tipo de solver	FFEPlus
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar

Tabla 5.2: Propiedades del material ABS

Nombre	ABS
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Criterio de error predeterminado	Desconocido
Límite de tracción	$3 \times 10^7 N/m^2$
Módulo elástico	$2 \times 10^9 N/m^2$
Coefficiente de Poisson	0,394
Densidad	$1020 kg/m^3$
Módulo cortante	$3,189 \times 10^8 N/m^2$

5.1.1. Análisis estructural del UAV

Dado que los motores están acoplados a la estructura del cuadricóptero, la primera pieza a comprobar debe ser dicha estructura. Observando las especificaciones de los motores que se encuentran en el documento de anexos se observa que dados los requerimientos de la sección ??, el empuje máximo que pueden proporcionar es de 2,5N cada uno. Por este motivo, se ha analizado la estructura bajo una carga de 10N. En la tabla 5.3 se puede ver un resumen de las propiedades de la estructura del cuadricóptero.

Tabla 5.3: Propiedades de la estructura del cuadricóptero

Masa	$0,0750721 kg$
Volumen	$7,36001 \times 10^{-5} m^3$
Peso	$0,735706 N$

A continuación se comentará el proceso que se ha seguido para la simulación con más detenimiento.

Condiciones de contorno

En primer lugar, una vez incorporado el diseño al área de simulación, se han elegido la posición de las cargas y de las sujeciones.

Tal y como se puede ver en la figura 5.1 las sujeciones del cuadricóptero son las pletinas a las que está atornillado en el montaje. Estas sujeciones han sido elegidas como

fijas ya que al estar atornilladas a un elemento mucho más rígido se puede suponer que en comparación no se deformarán.

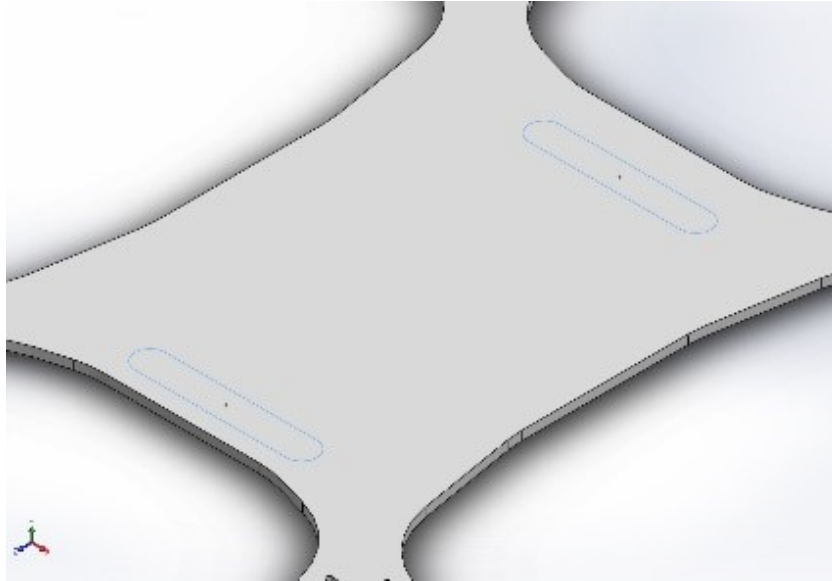


Figura 5.1: Sujeciones del cuadricóptero aplicadas en el análisis de elementos finitos.

Además, en la posición en la que se deben encontrar los motores se han aplicado cuatro fuerzas verticales de 10N en total como se puede ver en la figura 5.2

Una vez definidas las condiciones de contorno se debe mallar la estructura.

Mallado

Para mallar la estructura se ha utilizado el mallador del software SolidWorks. La información sobre la malla se puede ver en la tabla 5.4. Tal y como se puede ver en la figura 5.3 se ha refinado la malla alrededor de los puntos críticos de la estructura, en este caso el punto de anclaje de los motores.

Tabla 5.4: Propiedades de la malla utilizada en el análisis del cuadricóptero

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Activar
Tamaño de elementos	0,00228858 m
Tolerancia	0,000114429 m
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	132448
Número total de elementos	79093

Resultados

Para finalizar usando las condiciones de contorno y el mallado ya descrito se ha simulado la estructura. Una vez simulada, se han analizado dos datos concretos, las

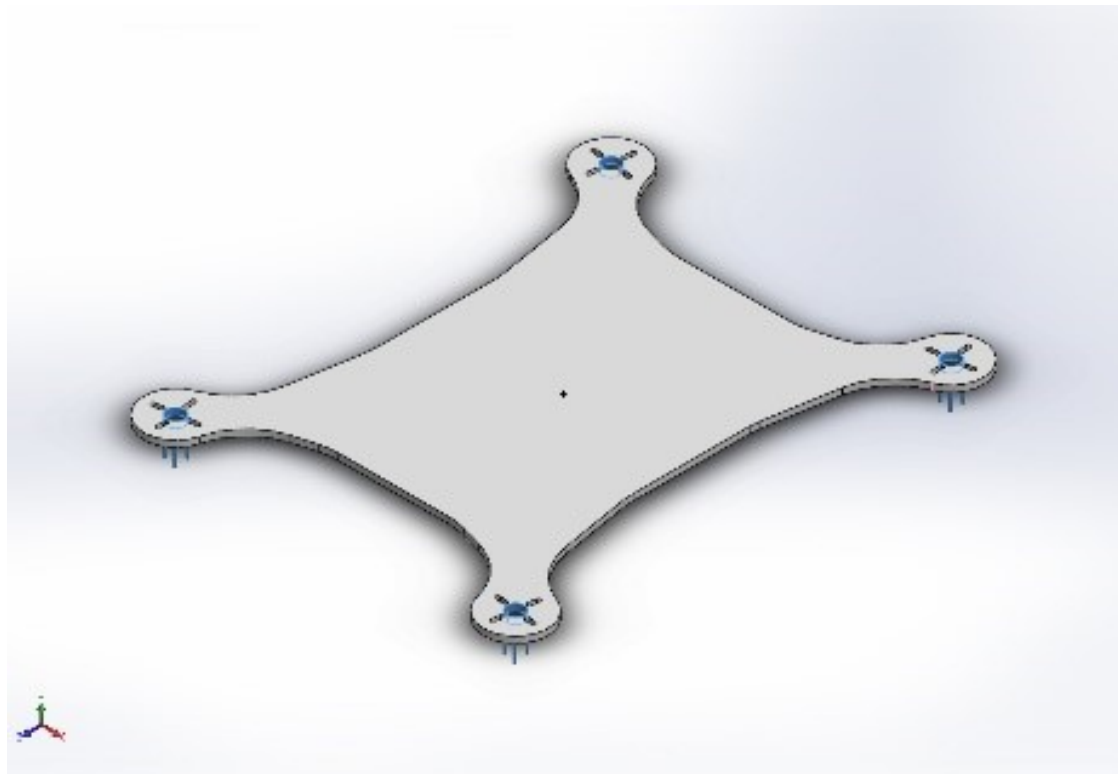


Figura 5.2: Estructura del cuadricóptero con la señalización de las cargas aplicadas mediante líneas púrpuras.



Figura 5.3: Malla del cuadricóptero.

tensiones de *von Mises* y los desplazamientos. Estos resultados se pueden ver en las figuras 5.4 y 5.5.

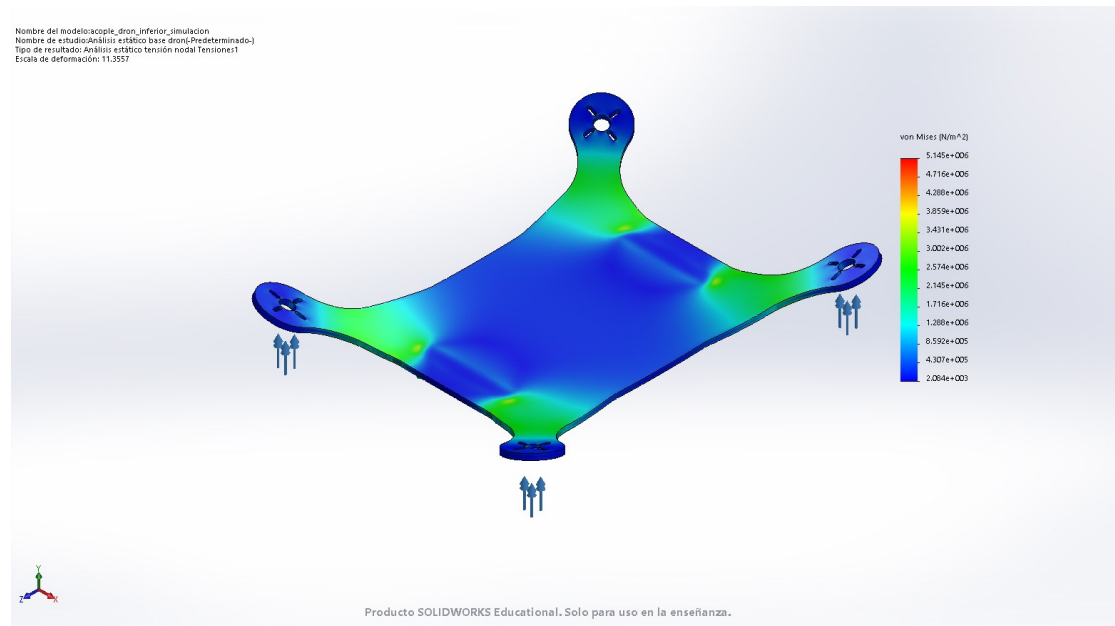


Figura 5.4: Resultado de las tensiones de *von Mises* a lo largo de la estructura del cuadricóptero.

En primer lugar, se debe analizar que los resultados obtenidos sean coherentes. En este caso los resultados muestran la deformación esperada por lo que es razonable asumir que el resto de resultados tengan sentido.

De estos resultados se ha obtenido el desplazamiento máximo de la estructura y el punto que sufre la tensión máxima de *von Mises*.

Tal y como se esperaba antes de la simulación, el desplazamiento máximo de la estructura se encuentra en el zona de fijación de los motores. El nodo con mayor desplazamiento se mueve $0,0024392\text{m}$. Esta deflexión no es preocupante ya que un movimiento de dos milímetros es despreciable en el modelo matemático.

Por último, la tensión máxima de *von Mises* se encuentra en el estrechamiento entre el cuerpo del cuadricóptero y la fijación de los motores. El valor de esta tensión es de $5,14497 \times 10^6 \text{N}/\text{m}^2$, un orden menor del límite admisible.

Los resultados de esta simulación nos indican que el diseño puede soportar las fuerzas máximas que pueden producir los motores con un coeficiente de seguridad de aproximadamente 10 por lo que en principio esta parte de la estructura no debería fallar.

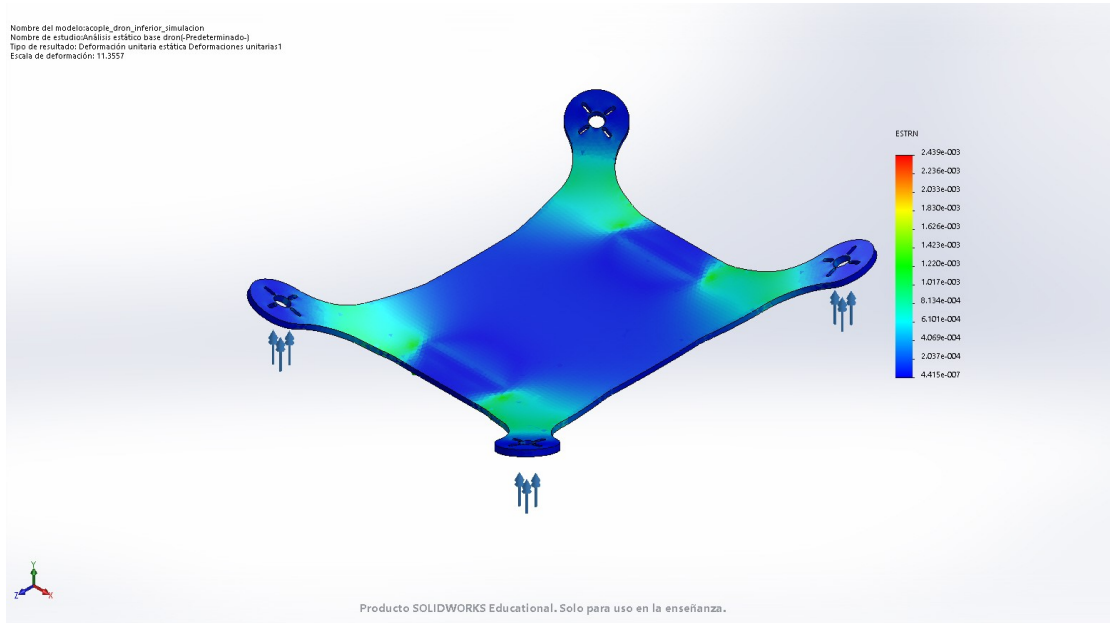


Figura 5.5: Resultado de las deformaciones del cuadricóptero tras la simulación.

5.1.2. Análisis estructural del Anillo

La siguiente pieza a analizar es el anillo fabricado mediante impresión 3D. Este análisis permite estimar el tamaño mínimo necesario del anillo para poder soportar las cargas que produce el cuadricóptero. Además, las pruebas de fabricación también marcan un mínimo de tamaño ya que cuanto más fina es la piezas más difícil es su producción. Superponiendo estas informaciones se puede calcular el tamaño idóneo de las piezas que forman el anillo.

Las propiedades del ensamblaje completo que forma el anillo se encuentran resumidas en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Propiedades estructurales del ensamblaje del anillo

Masa	0,893kg
Volumen	$8,405 \times 10^{-4}m^3$
Peso	8,76N

Condiciones de contorno

Para poder aplicar las condiciones de contorno en el anillo se deben tener en cuenta todas las fuerzas externas que sufre. Para obtener una simulación con la cual se puedan obtener límites de diseño se debe simular el caso en el que el anillo sufra una fuerza mayor. Este caso ocurre cuando el cuadricóptero ejerza la mayor tracción posible. Por este motivo, la mayor carga que puede sufrir el anillo es la tracción máxima del cuadricóptero menos el peso del mismo cuadricóptero. En este caso, se debe tener en cuenta el peso del tubo de aluminio y de las pletinas que unen el UAV al anillo por lo que la máxima

fuerza que puede sufrir el anillo es de 9N en vertical. Esta carga será transmitida por la barra de aluminio por lo que se puede simular como una carga puntual en la posición del anillo rozante que une ambas estructuras, tal y como se ve en la figura 5.6 con las flechas púrpuras.

Al igual que se ha hecho con el cuadricóptero se deben aplicar unas fijaciones para que el sistema esté en equilibrio estático. Tal y como se muestra en la figura 5.6, flechas verdes, se han aplicado las fijaciones en la sección que hace contacto con el rotor del anillo rozante de tipo 2.

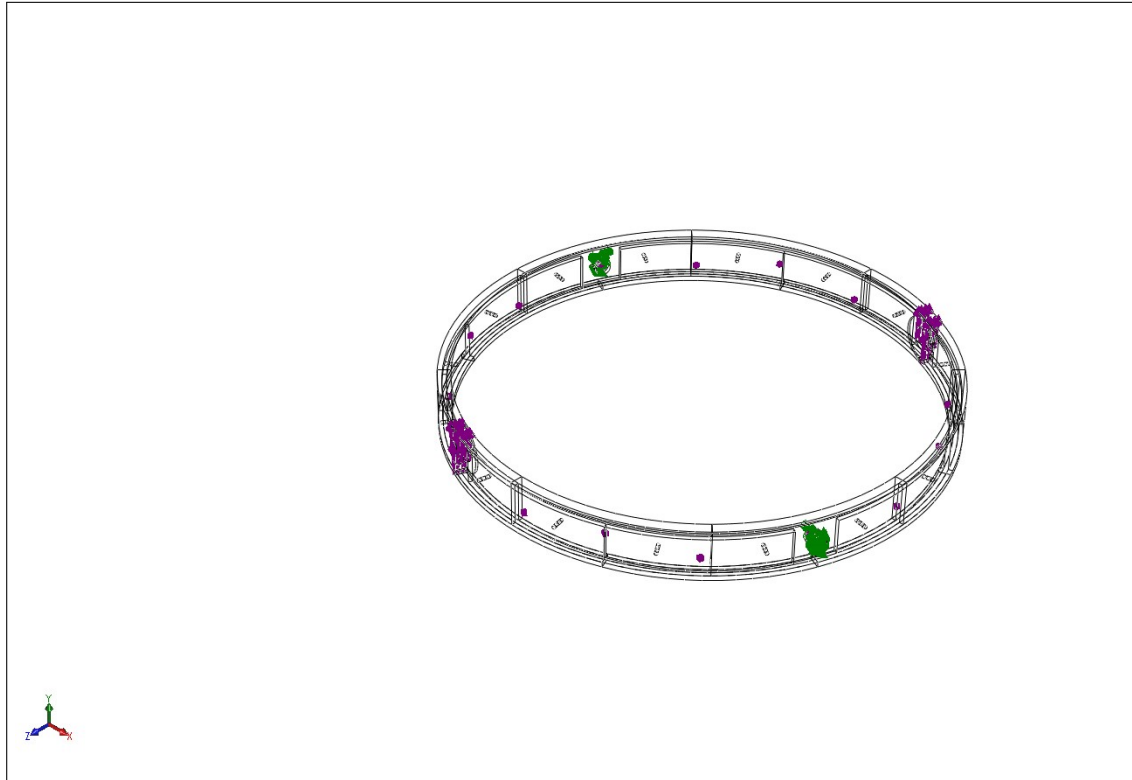


Figura 5.6: Posición de las cargas y sujeciones en el anillo.

Mallado

Una vez definidas las condiciones de contorno del anillo se procede al mallado del mismo. Para obtener una información más precisa en la cercanía de las cargas y las sujeciones se ha refinado la malla en esos puntos, como se puede ver en la figura 5.7. Se han resumido las propiedades de la malla en la tabla 5.6.

Una vez mallada la estructura se aplica el solver elegido y se obtienen los resultados de la siguiente sección.

Tabla 5.6: Propiedades de la malla utilizada en el análisis del anillo

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Activar
Tamaño de elementos	0,0263261 m
Tolerancia	0,00526522 m
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	439460
Número total de elementos	279825

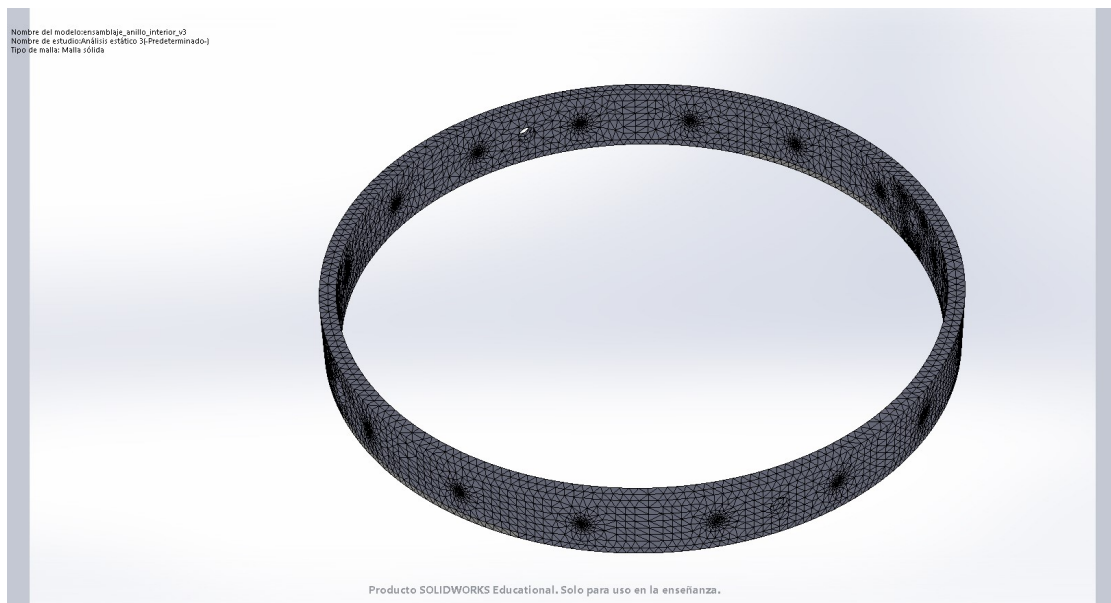


Figura 5.7: Malla del anillo.

Resultados

Al igual que en la estructura anterior una vez resuelto el sistema se han analizado dos resultados. En primer lugar, se ha observado que la deformación que se ve en la figura 5.8 se corresponde con la deformación esperada. Esta confirmación nos indica que los resultados de la simulación son coherentes.

En segundo lugar, se ha observado el valor de la deformación máxima. Estas deformaciones se encuentran cerca de los puntos de la aplicación de la carga, tal y como se ve en la figura 5.8, y su valor es de 0,20mm por lo que el desplazamiento es casi despreciable.

Por último, se han estudiado las tensiones de *von Mises* en la estructura. Para asegurar que no falle ningún punto del anillo todos los nodos de la simulación deben tener una tensión por debajo de la crítica. En este caso, el nodo que más sufre tiene una tensión de $1,24659 \times 10^6 N/m^2$.

Concluyendo, el anillo sufre unas deformaciones y tensiones despreciables cuando se comparan con los valores límite del material. El coeficiente de seguridad del diseño es de 25 por lo que no debería tener ningún problema en asumir las cargas que provienen del cuadricóptero.

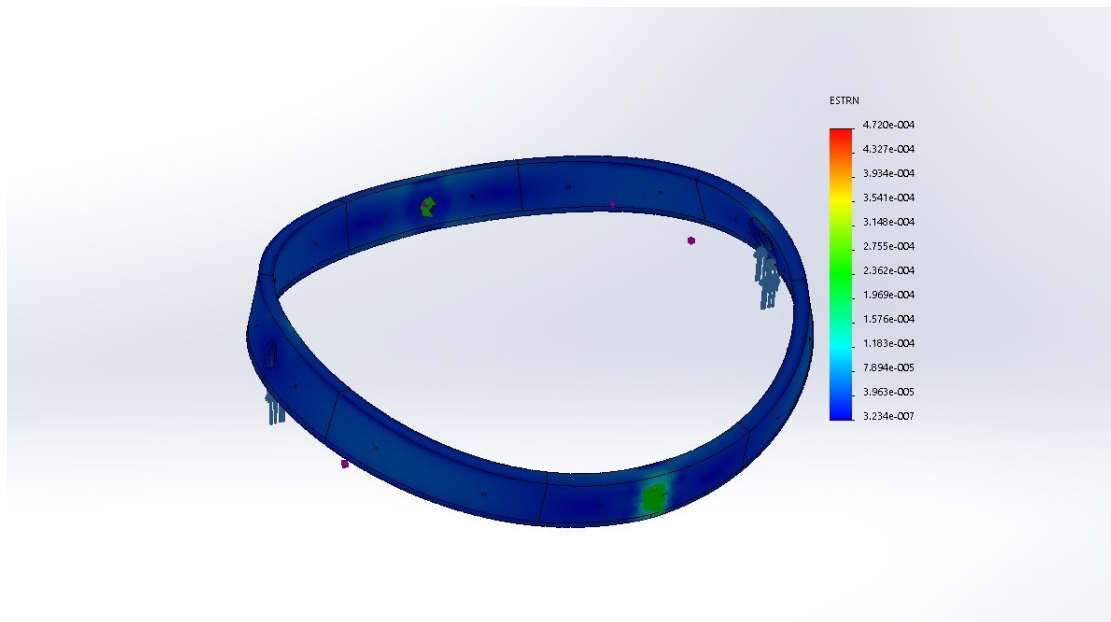


Figura 5.8: Simulación de las deformaciones del anillo bajo las cargas estudiadas.

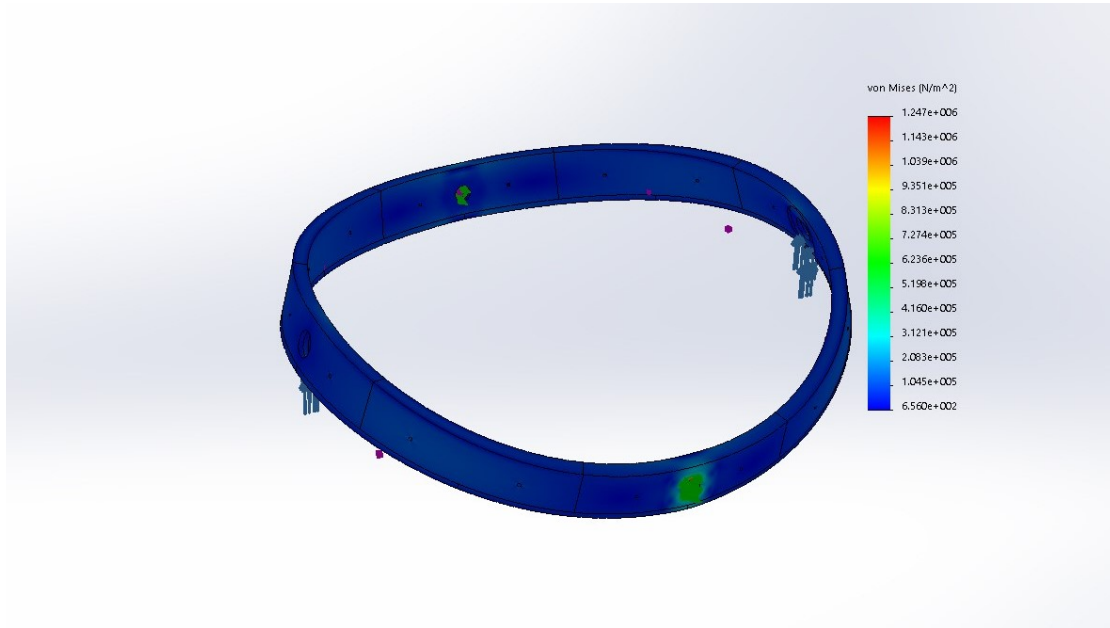


Figura 5.9: Simulación de las tensiones de *von Mises* del anillo bajo las cargas estudiadas.

5.1.3. Análisis estructural de las piezas de acople entre el anillo y las columnas metálicas

Para poder analizar las piezas de impresión 3D que unen el anillo a las columnas metálicas se ha añadido el anillo rozante de tipo 1 al análisis. Al realizar este análisis se asume que las propiedades del plástico del que está fabricado el anillo rozante son las muy similares a las propiedades del ABS. En la tabla 5.7 se encuentran las propiedades de ensamblaje que se ha analizado. Además, en el caso en el que los ensamblajes sufren la mayor carga, cuando el cuadricóptero está bocabajo, los dos sufren la misma carga ya que existe simetría de carga y de geometría. Para el análisis se ha dividido la carga que sufren en ese caso entre dos y se ha aplicado a uno de los ensamblajes.

Tabla 5.7: Propiedades estructurales del ensamblaje del anillo

Masa	0,218kg
Volumen	$2,33 \times 10^{-4}m^3$
Peso	2,14N

Condiciones de contorno

En primer lugar, se ha aplicado la condición de contorno de fuerza que se ha comentado en la sección anterior. Esta condición ha sido aplicada en el rotor del anillo rozante tal y como indican las flechas púrpuras de la figura 5.12. La carga que se ha descrito anteriormente está constituida por el máximo empuje y peso del cuadricóptero y el peso del anillo, por lo que en total suma 20N en total. Por lo tanto, se han aplicado 10N en el anillo rozante.

En segundo lugar, se han fijado varias secciones de la estructura para asegurar que el sistema sea estático. En este análisis se han fijado las secciones del ensamblaje que entran en contacto con las columnas de metálicas. Esta sección está marcada en rojo en la figura 5.10

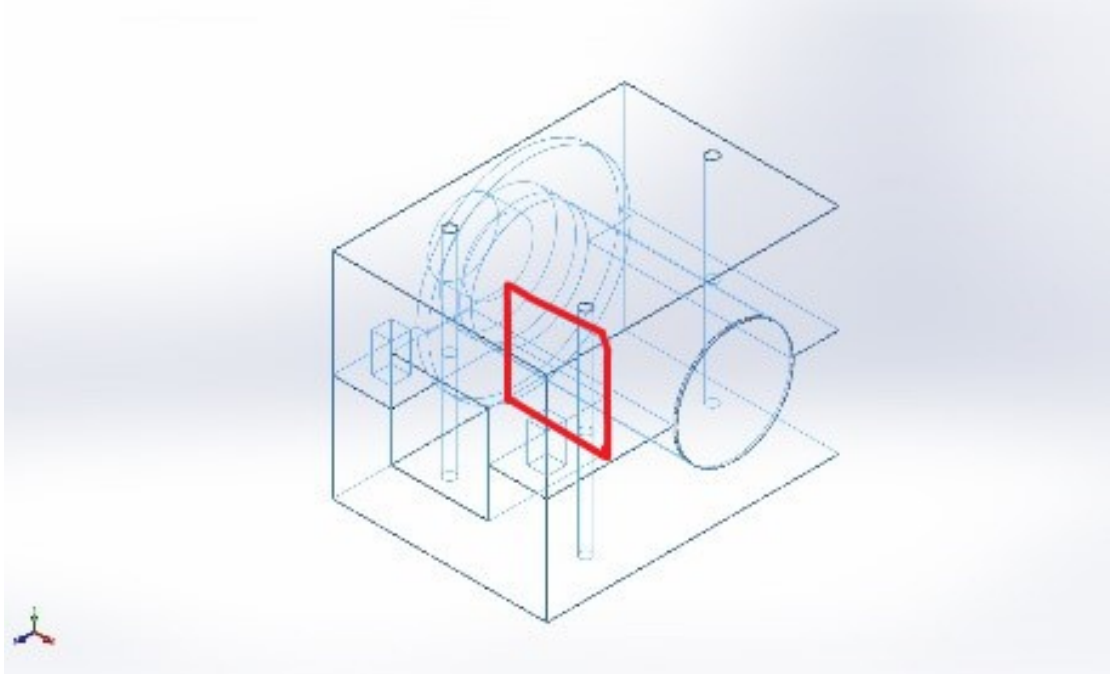


Figura 5.10: Ilustración de la sección fijada en el análisis marcada en rojo.

Mallado

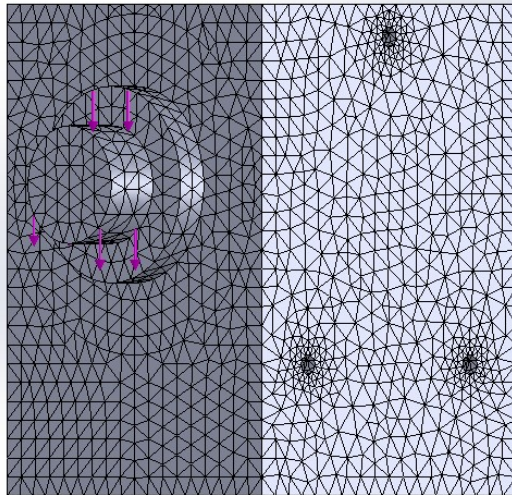
Usando el asistente de mallado que proporciona SolidWorks se ha obtenido una malla para el ensamblaje con las propiedades de la tabla 5.8. El aspecto del mallado se puede observar en la figura 5.11.

Tabla 5.8: Propiedades de la malla utilizada en el análisis de la pieza de acople entre el anillo las columnas metálicas

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Activar
Tamaño de elementos	0,00298819 m
Tolerancia	0,000149409 m
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	112890
Número total de elementos	78532

Los elementos del mallado que se han usado para el ensamblaje tienen un tamaño medio de 3mm, además se ha afinado el mallado en especial al llegar a cambios de geometría. Estos dos puntos ayudan a que el mallado sea eficaz y de calidad.

Nombre del modelo: Ensamblaje1
Nombre de estudio: Análisis estático 1 (Predeterminado)
Tipo de malla: Malla sólida



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Figura 5.11: Mallado de la estructura que une el anillo con las columnas metálicas.

Resultados

Como en los dos casos anteriores, en primer lugar se ha analizado si la deformación del ensamblaje tiene sentido. Tal y como se ve en la figura 5.12 el mayor desplazamiento se observa en el rotor del anillo rozante. Esta solución de desplazamientos es lógica ya que la zona más próxima a la aplicación de la carga es la que más se desplaza. Al obtener una solución coherente se puede proceder con el análisis de desplazamientos y de tensiones.

La primera solución a analizar son los desplazamientos que sufre el ensamblaje. Estos desplazamientos, que se pueden ver en la figura 5.12, indican que el máximo desplazamiento es de $0,002284\text{mm}$ por lo que realmente es despreciable.

A continuación se comprueba analizando las tensiones de *von Mises* si al igual que con los desplazamientos, las cargas también son despreciables. La solución indica que el nodo más cargado de la estructura sufre una tensión de $155809\text{N}/\text{m}^2$. Esta tensión no implica ningún riesgo para la estructura ya que la tensión máxima, que se encuentra en la tabla 5.2, es casi cien veces mayor.

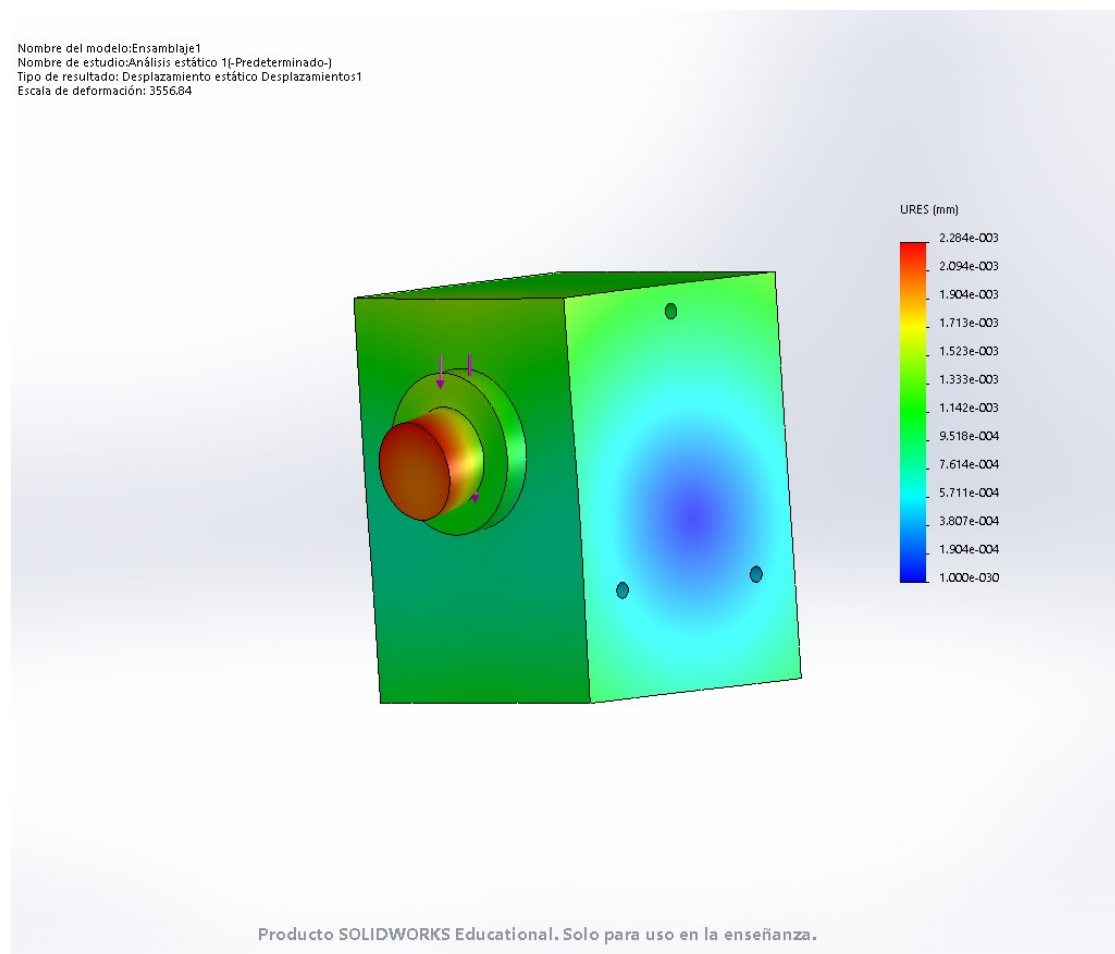


Figura 5.12: Solución de desplazamientos del análisis realizado en la unión entre el anillo y la estructura metálica.

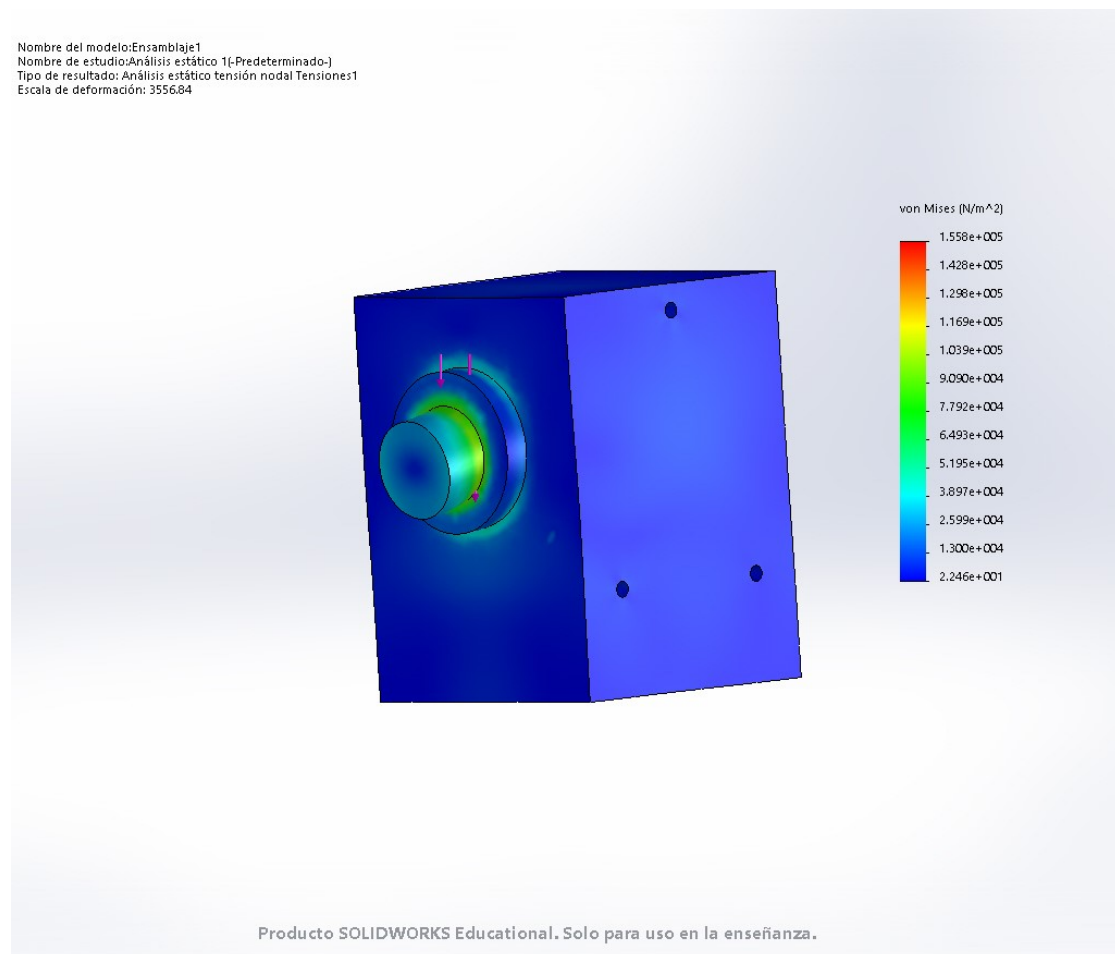


Figura 5.13: Tensiones de *von Mises* en la unión entre el anillo y la estructura metálica.

Concluyendo, los análisis que se han realizado en esta sección han demostrado que en teoría ninguna de las piezas supone un peligro estructural para la plataforma giroscópica cuando esta está sometida a máxima carga. Una vez fabricada la plataforma estas simulaciones deben corroborarse mediante pruebas de esfuerzo.

5.2. Tests de funcionamiento

A continuación se comentarán las pruebas a las que se ha sometido la estructura una vez fabricada. En este caso se han realizado unos ensayos simples en los que se ha comprobado mediante inspección visual que la estructura no sufre ningún tipo de problema estructural durante el funcionamiento de la base y al mismo tiempo que la base funciona de la forma esperada.

5.2.1. Prueba de peso muerto

Este primer ensayo es de carácter estructural y sirve para comprobar que todas las piezas estudiadas son capaces de soportar el peso del UAV o el peso del UAV y del anillo. Como se ve en la figura 5.14, una vez el montaje a finalizado, la estructura no sufre ninguna deformación que no sea despreciable.

5.2.2. Prueba a máxima tracción

Este segundo ensayo se ha realizado en el laboratorio y se ha podido comprobar como una vez encendidos los motores del UAV a máxima potencia ninguno de los elementos de la plataforma se deforma de manera apreciable. Además, este ensayo a ayudado a comprobar que no solo la plataforma no sufre estructuralmente si no que el resto de elementos son capaces de funcionar sin problema alguno cuando los motores se encuentran a pleno rendimiento.

Concluyendo, los ensayos reales que se han realizado sobre la plataforma han corroborado el buen funcionamiento que presagiaban las simulaciones de elementos finitos. No se han podido confirmar las deformaciones y tensiones calculadas en las simulaciones debido a que son tan pequeñas que se ha carecido de la instrumentación necesaria para poder medirlas.



Figura 5.14: Foto de la estructura una vez realizado el montaje.

Capítulo 6

Conclusiones.

Al principio del proyecto se propusieron un listado de objetivos que debían cumplirse si el proyecto se había realizado con éxito. Una vez finalizado el proceso de diseño y prototipado de la base giroscópica se debe analizar si estos objetivos han sido cumplidos de manera exitosa y si existe alguna forma de mejorar o ampliar el proyecto.

Desde un principio, los objetivos del proyecto han sido numerosos y complicados. En primer lugar, se ha debido diseñar una base giroscópica que pueda ser usada en el ámbito docente. El diseño debe poder girar libremente en los tres ejes, debe ser de uso intuitivo y al mismo tiempo debe poder ser reparado de manera fácil y poco costosa. Además, la plataforma debe ser robusta y de un tamaño optimizado para ocupar el mínimo espacio dentro del laboratorio. En segundo lugar, se ha debido diseñar un UAV que pueda ser acoplado a la plataforma giroscópica para poder ensayar algoritmos de control sobre el mismo. Por último, todos los sistemas del UAV deben ser alimentados por una fuente de alimentación que se encuentre estática en el suelo.

Tal y como se ha comentado en los capítulos 3, 4 y 5 para poder cumplir estas especificaciones se han debido llevar a cabo un gran número de procesos.

Para comenzar, se han realizado múltiples diseños conceptuales. De cada uno de los diseños se han barajado sus ventajas y desventajas, como ha sido el caso de la robustez de los anillos de aluminio y a la vez su baja reparabilidad. La elección final del diseño formada por piezas de fabricación aditiva fue clave por la versatilidad que otorgó al proyecto. La fabricación de piezas por impresión 3D no solo ha permitido corregir detalles de diseño de manera fácil y rápida si no que además permite que en el caso de fallo de alguna pieza el propio departamento pueda volver a fabricarla y sustituirla.

Una vez elegido el concepto de diseño, se realizó otro proceso de selección para el diseño de la piezas que formaban la plataforma. Para este diseño se han realizado múltiples conceptos mediante el software SolidWorks. La fabricación de las piezas mediante impresión 3D ha permitido concebir diseños que han permitido acoplar piezas clave, como han sido los anillos rozantes. Al poder añadir anillos rozantes a la plataforma se

ha podido diseñar un sistema de alimentación que permite el giro libre en los tres ejes del UAV y además no tener que acoplar baterías al sistema. Como se ha mostrado en el capítulo 5, una vez elegido el diseño a realizar se ha optimizado este diseño mediante simulaciones de elementos finitos. Este proceso de optimizado a permitido reducir el tamaño de distintas secciones en casi un 40 %.

Una vez fabricada y montada la plataforma, se han realizado diversos tests para confirmar el correcto funcionamiento del sistema. Al realizar estas pruebas no solo se ha confirmado que el dron puede girar alrededor de sus tres ejes sin resistencia alguna, por lo tanto se ha cumplido el objetivo de movimiento propuesto, si no que también se han confirmado los resultados de robustez de las simulaciones. Estos ensayos han confirmado el cumplimiento de todos los objetivos que se propusieron al inicio del proyecto. Sin embargo, aún habiendo cumplido todos los objetivos se puede seguir trabajando en el proyecto.

En primer lugar, sería útil realizar un diseño de esta misma plataforma cambiando las piezas de plástico por piezas aluminio. Este segundo diseño podría usarse en caso de querer producir grandes cantidades del producto. Por último, el diseño podría mejorarse mediante la sensorización de la plataforma. Si se pudiese conocer la actitud del UAV mediante sensores colocados en la plataforma, se ayudaría al desarrollo de los algoritmos de control que se prueban en ella.

Bibliografía

- [1] A. Barrientos, J. del Cerro, P. Gutiérrez, R. San Martín, A. Martínez, and C. Rossi, “Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. tecnología y aplicaciones,” *CEDI*, 2007.
- [2] J. D. Blom, “Unmanned aerial systems: A historical perspective,” September 2010.
- [3] S. Bouabdallah, “Design and control of quadrotor with application to autonomous flying,” Ph.D. dissertation, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, Feb. 2007.
- [4] A. Cuerva Tejero, J. Meseguer Ruiz, A. Sanz Andres, J. L. Espino Granado, and O. Lopez Garcia, *Teoría de los helicópteros*. Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [5] G. M. Hoffmann, H. Huang, S. L. Waslander, and C. J. Tomlin, “Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2007.
- [6] S. S. C. John F. Keane, *A Brief History of Early Unmanned Aircraft*, 2013, vol. 32, no. 3.
- [7] M. R. Jose Pedro, “Mecánica de vuelo (ii),” Jan. 2017.
- [8] J. E. Lopez Conde, “Impresoras 3d,” *Centro de Analisis y Prospectiva Gabinete Tecnico de la Guardia Civil*, 2016.
- [9] I. C. A. Organization, “Unmanned aircraft systems (uas),” 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7. [Online]. Available: https://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_en.pdf
- [10] P. Pounds, R. Mahony, and P. Corke, “Modelling and control of a large quadrotor robot,” *Control Engineering Practice*, 2010.
- [11] J. Rico-Azagra, M. Gil-Martínez, R. Rico, and P. Maisterra, “Plataforma didáctica de bajo coste para el control de actitud y orientación de uavs multirrotor,” *Jornadas de automática*, 2016.

- [12] M. Vladimir Peña Giraldo, E. Carlos Vivas Gonzales, and C. Ivonn Rodríguez Feliciano, “Modelamiento dinámico y control lqr de un quadrotor,” *AVANCES Investigación en Ingeniería* 13, 2010.
- [13] Y. Yu and X. Ding, “A quadrotor test bench for six degree of freedom flight,” *J Intell Robot Syst*, 2012.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Trabajo Final de Grado

Diseño de Base Giroscópica para el Análisis de Control de la Actitud de Cuadricópteros

PLANOS

Autor:

Alberto Javier Pemán Hernández

Director:

Sergio García-Nieto Rodríguez

Valencia, a 6 de julio de 2017

Índice general

1. Planos de la base del cuadricóptero	1
2. Planos del anillo	3
3. Planos del frame	11
4. Planos de ensamblaje	17

Capítulo 1

Planos de la base del cuadricóptero

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

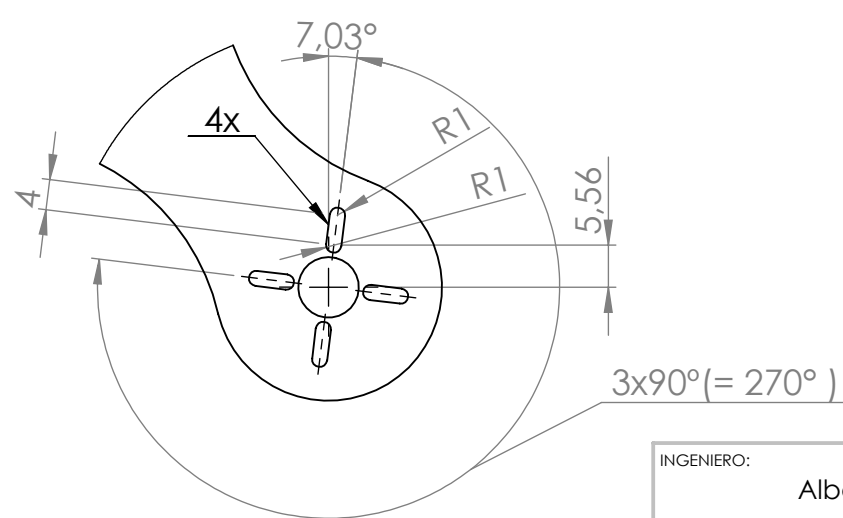
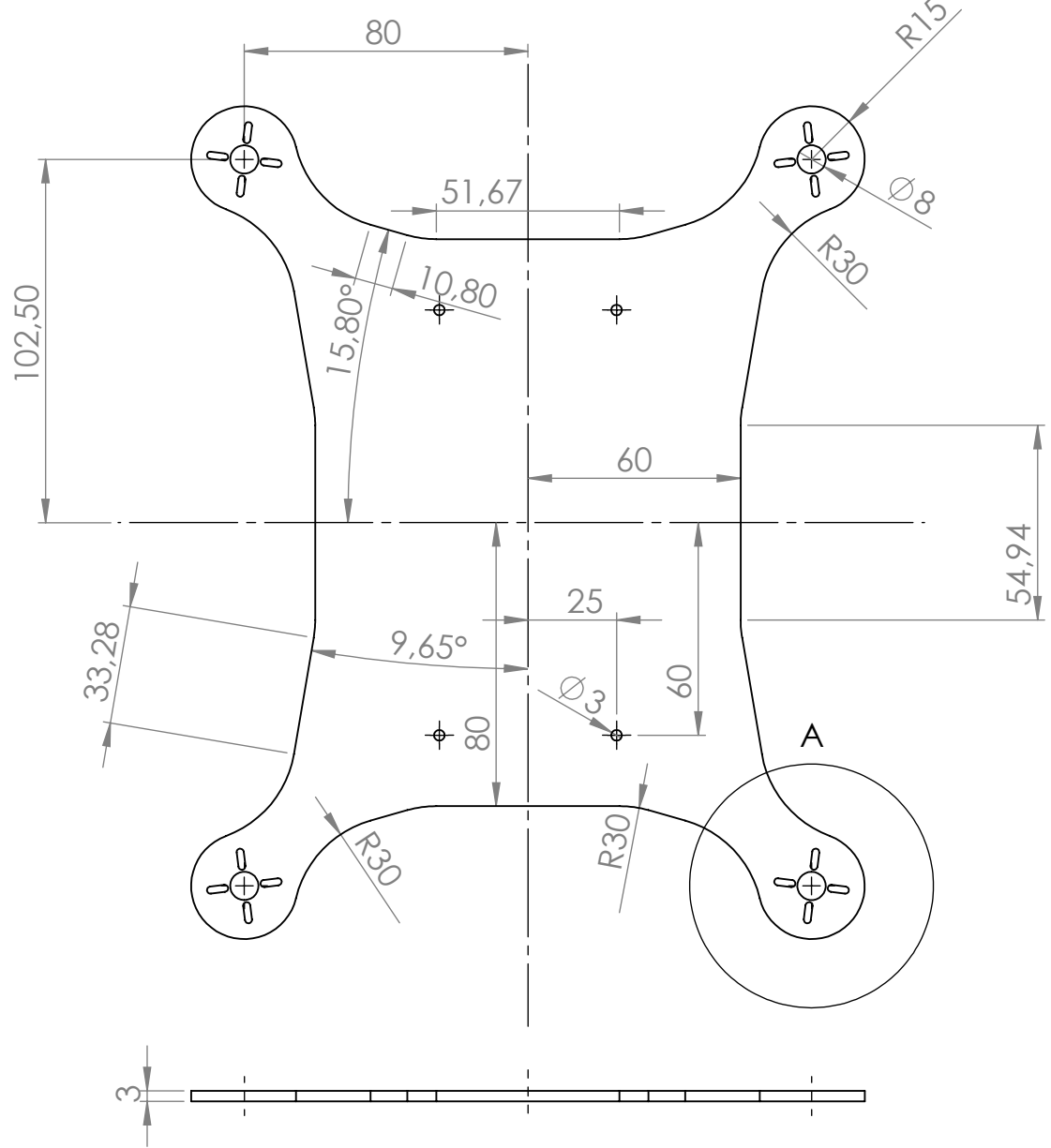
C

B

B

A

A



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

INGENIERO: Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO: UAV	
N.º DE DIBUJO 1	FIRMA:
ESCALA:1:2	UNIDADES: mm

4

3

2

1

Capítulo 2

Planos del anillo

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

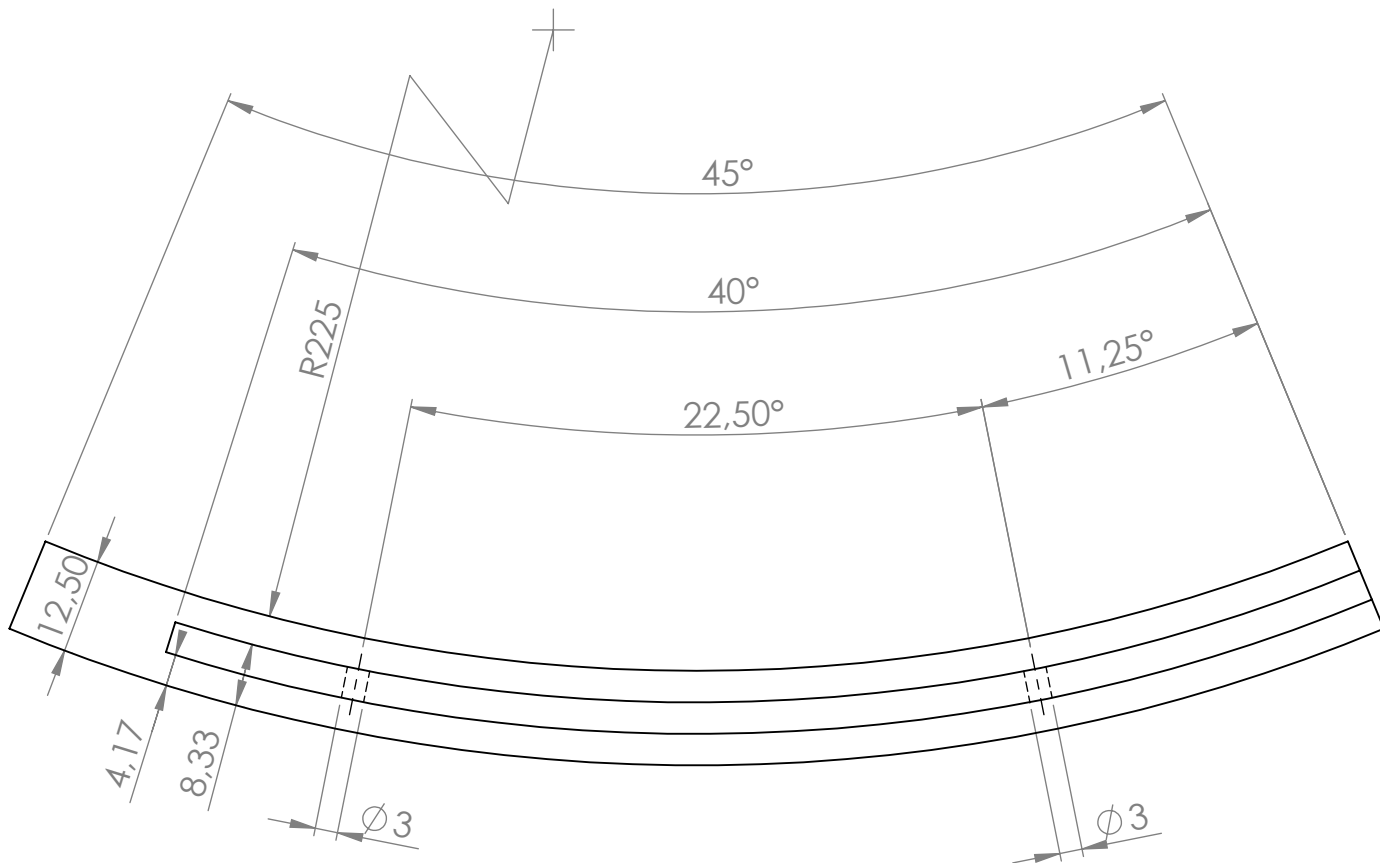
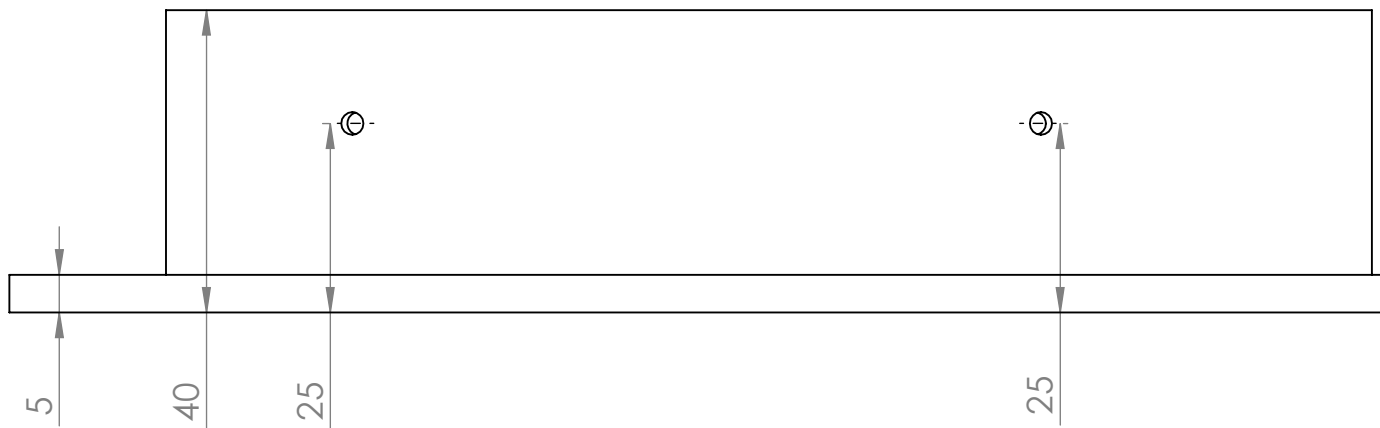
C

B

B

A

A



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

INGENIERO: Alberto Javier Pemán Hernández

TÍTULO: Bajo derecha 1

N.º DE DIBUJO: 2

FIRMA:

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

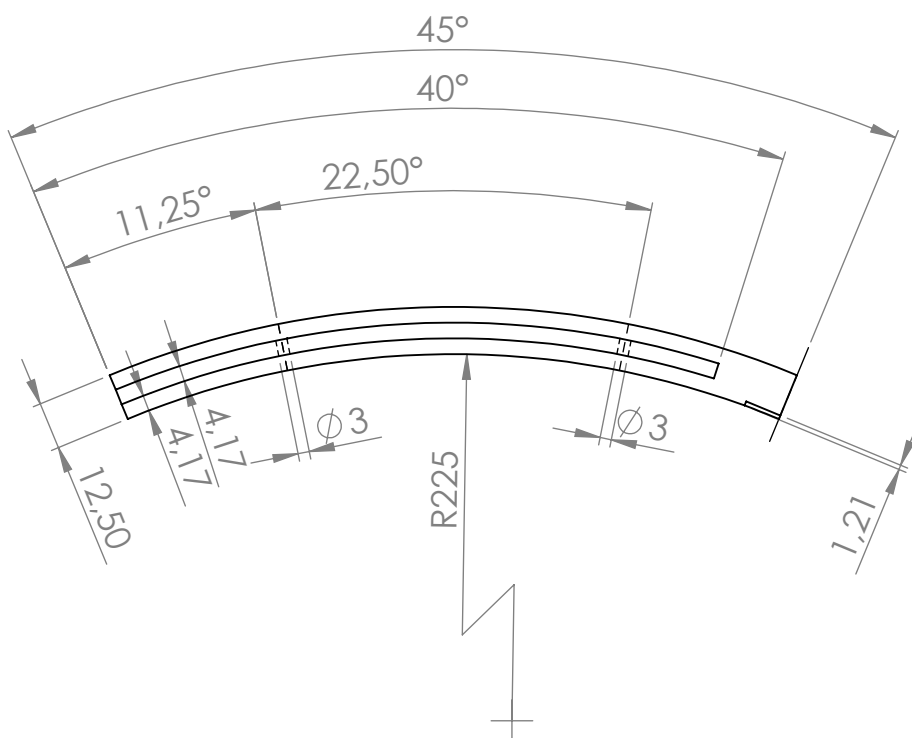
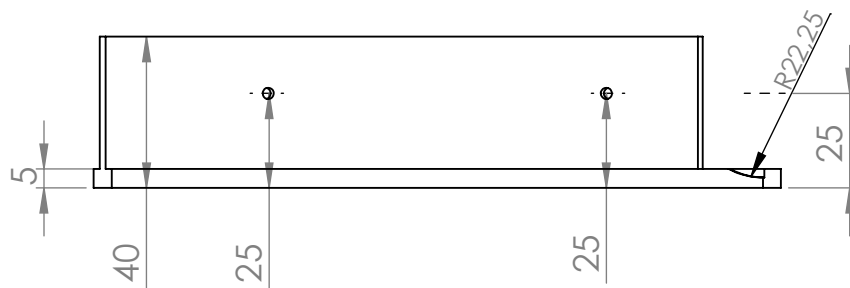
C

B

B

A

A



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

INGENIERO: Alberto Javier Pemán Hernández

TÍTULO: Bajo derecha 2

N.º DE DIBUJO: 3

FIRMA:

ESCALA: 1:2

UNIDADES: mm

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

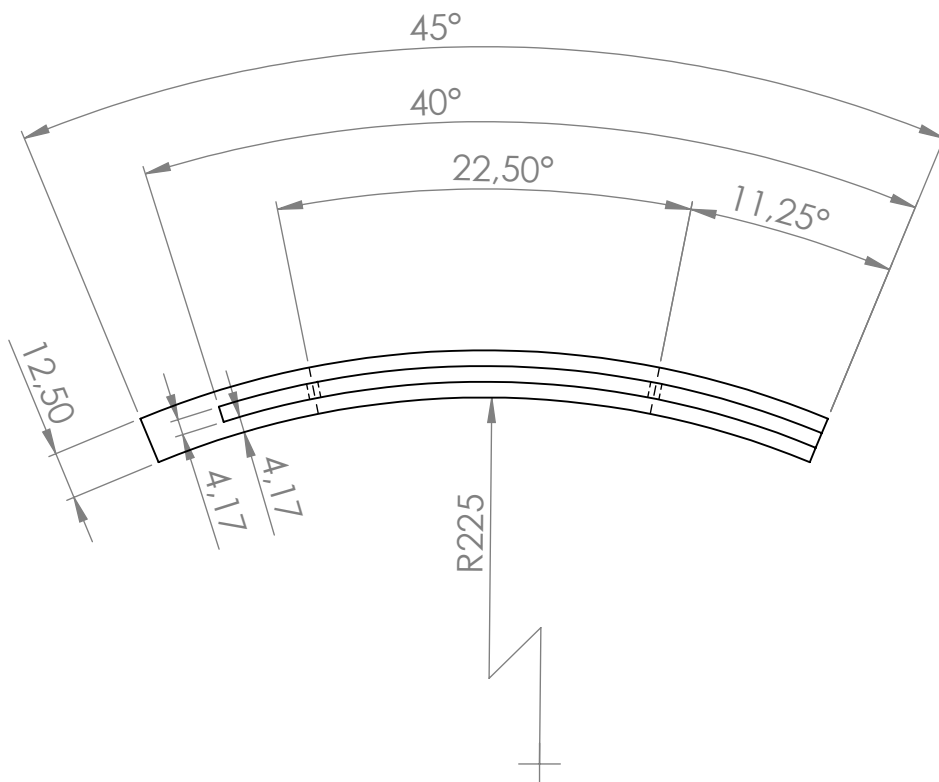
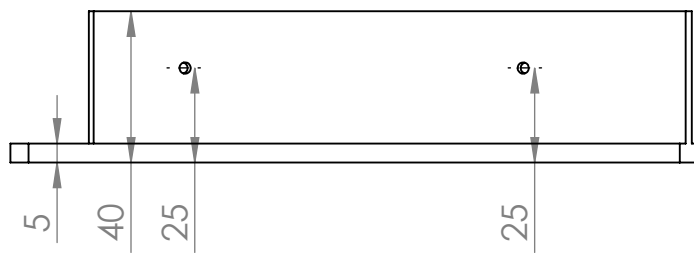
C

B

B

A

A



INGENIERO: Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO: Bajo izquierda 1	
N.º DE DIBUJO 4	FIRMA:
ESCALA:1:2	UNIDADES: mm

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

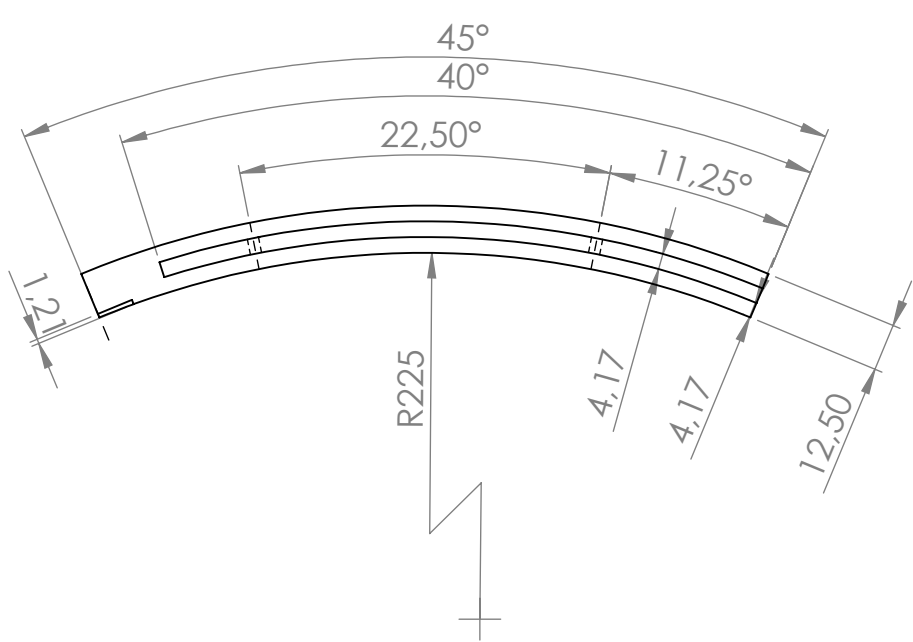
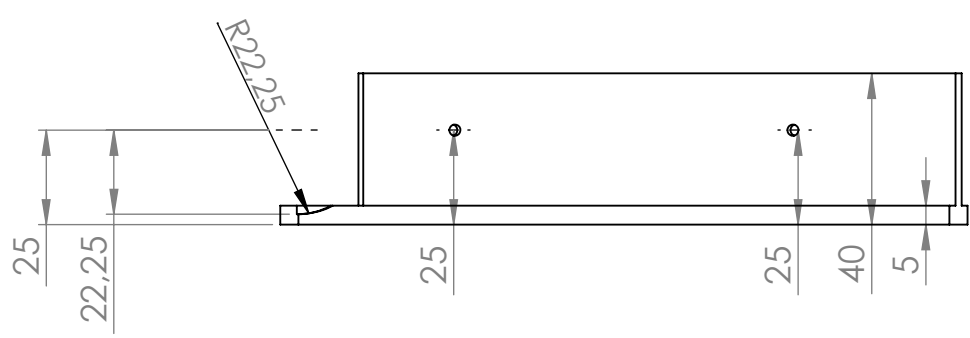
C

B

B

A

A



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

INGENIERO:		Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO:			
<h1>Bajo izquierda 2</h1>			
N.º DE DIBUJO		FIRMA:	
5			
ESCALA:1:2		UNIDADES: mm	

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

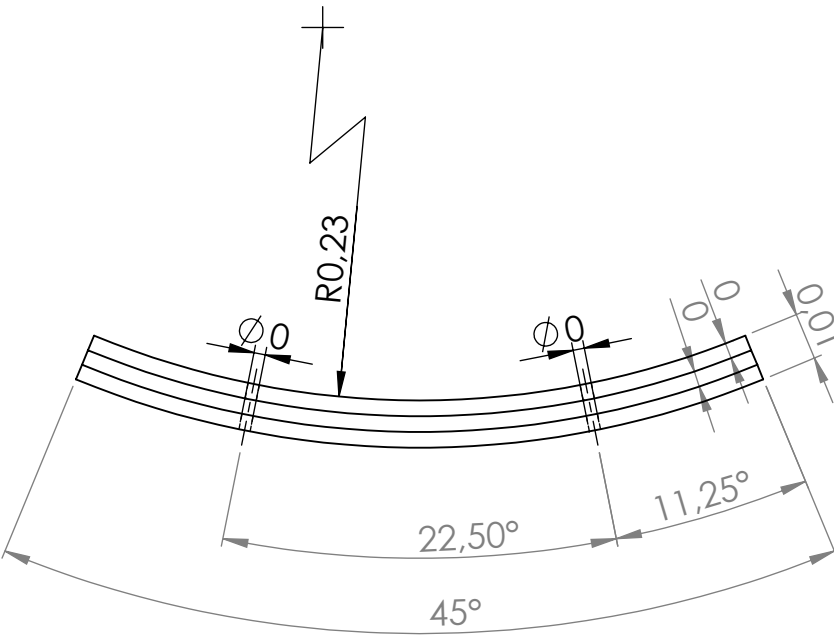
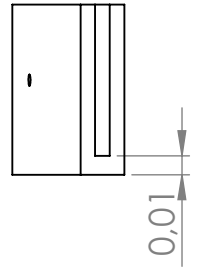
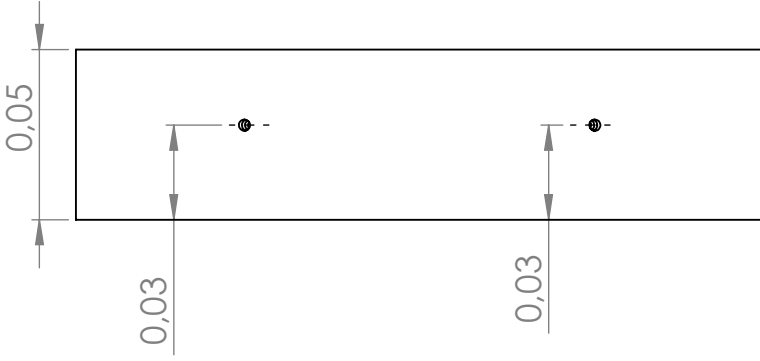
C

B

B

A

A



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

INGENIERO:		Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO:		Cubierta 1	
N.º DE DIBUJO	6	FIRMA:	
ESCALA:1:2		UNIDADES: mm	

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

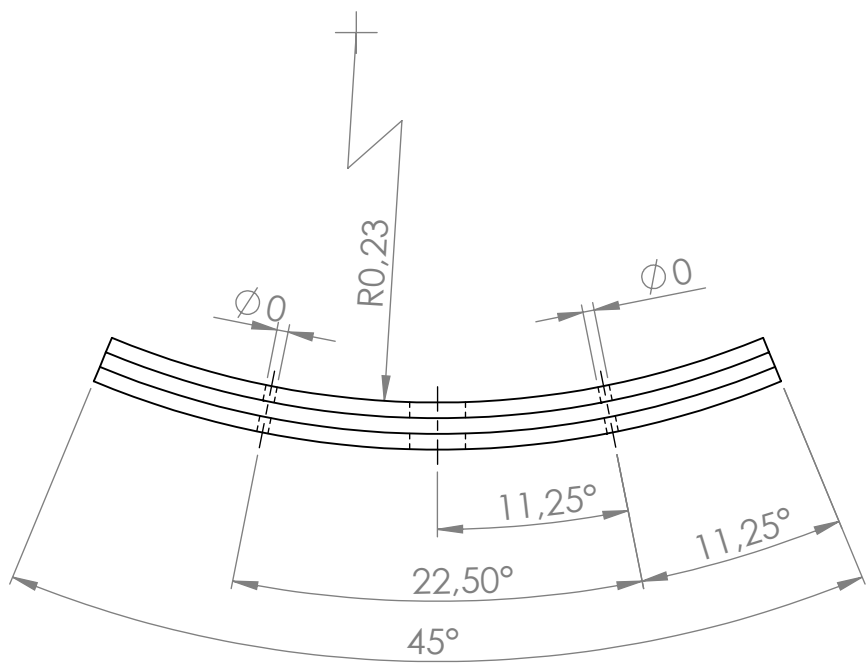
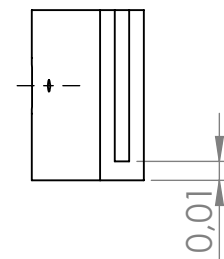
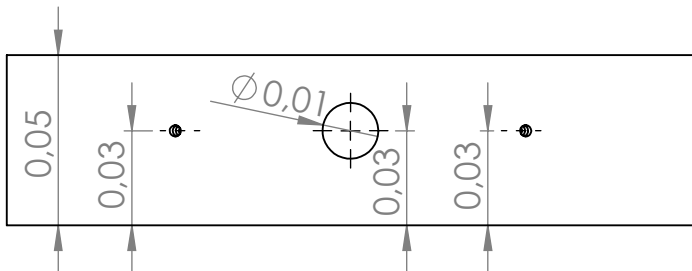
C

B

B

A

A



INGENIERO:		Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO:		Cubierta 2	
N.º DE DIBUJO	7	FIRMA:	
ESCALA:1:2		UNIDADES: mm	

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

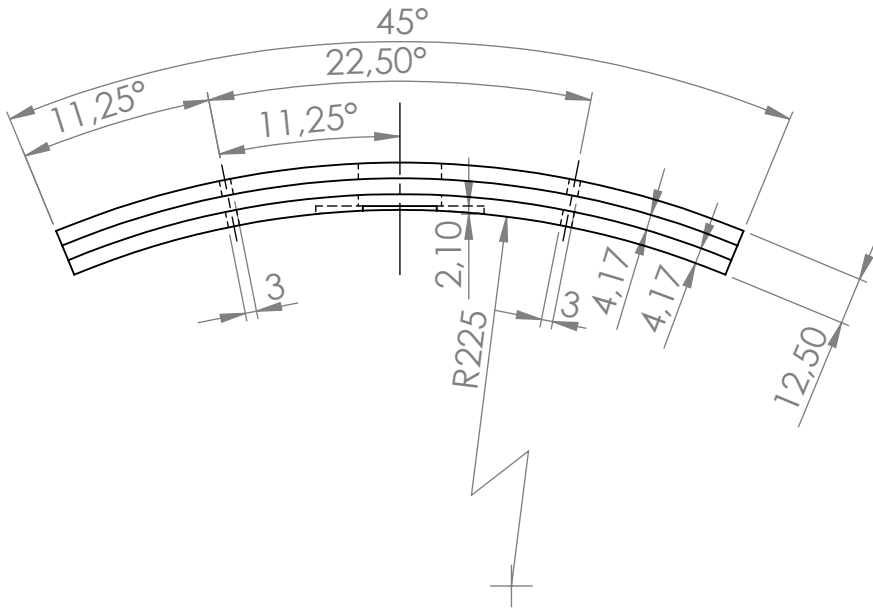
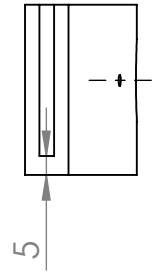
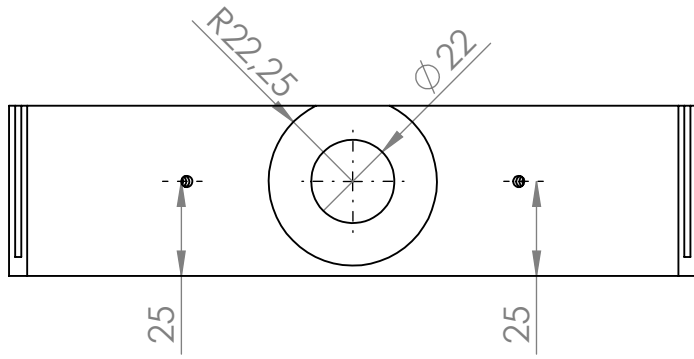
C

B

B

A

A



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

INGENIERO:		Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO:		Cubierta 3	
N.º DE DIBUJO	8	FIRMA:	
ESCALA:1:2		UNIDADES: mm	

Capítulo 3

Planos del frame

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

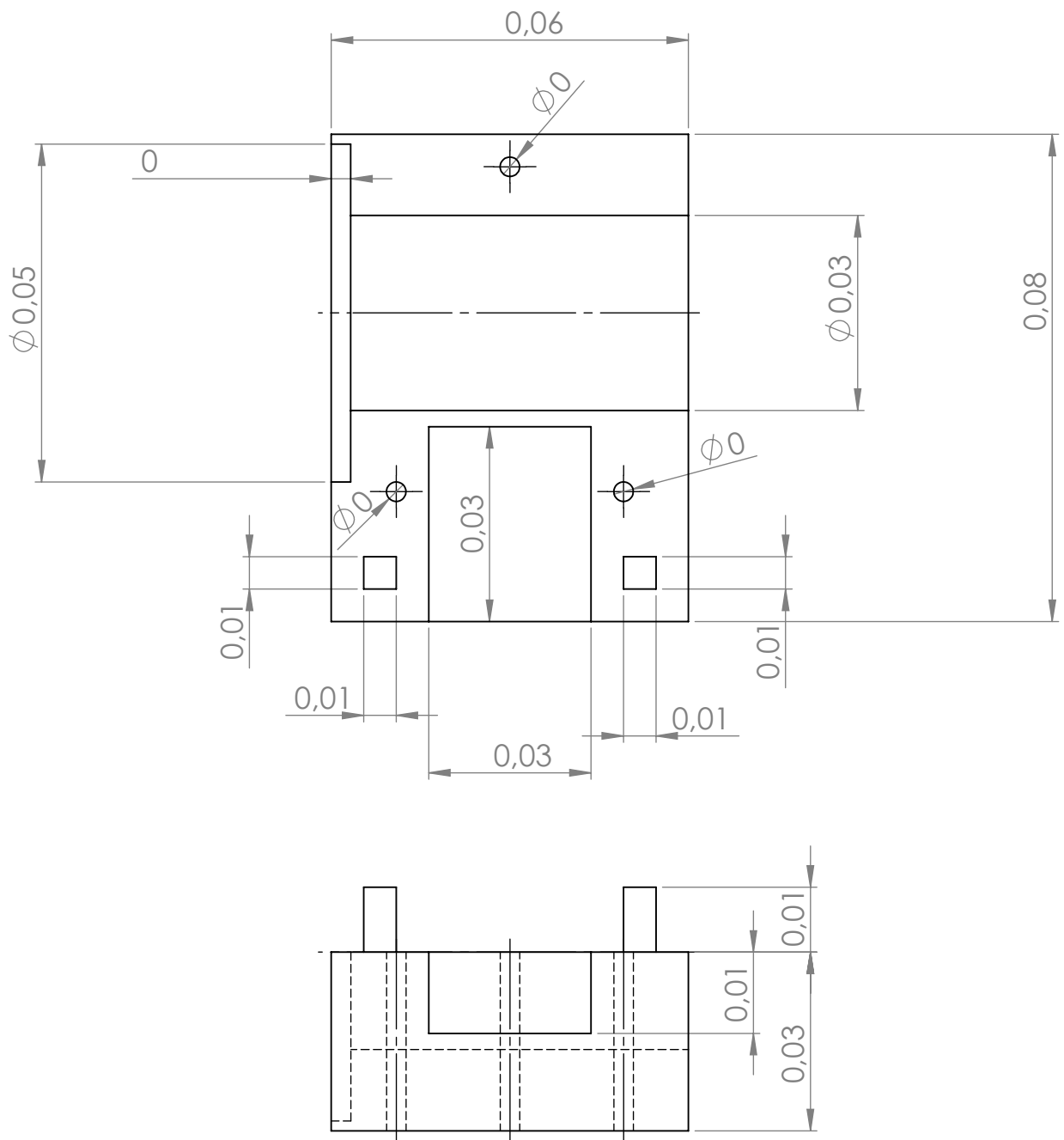
C

B

B

A

A



INGENIERO:		Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO:		Cubo 1	
N.º DE DIBUJO	9	FIRMA:	
ESCALA:1:1		UNIDADES: mm	

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

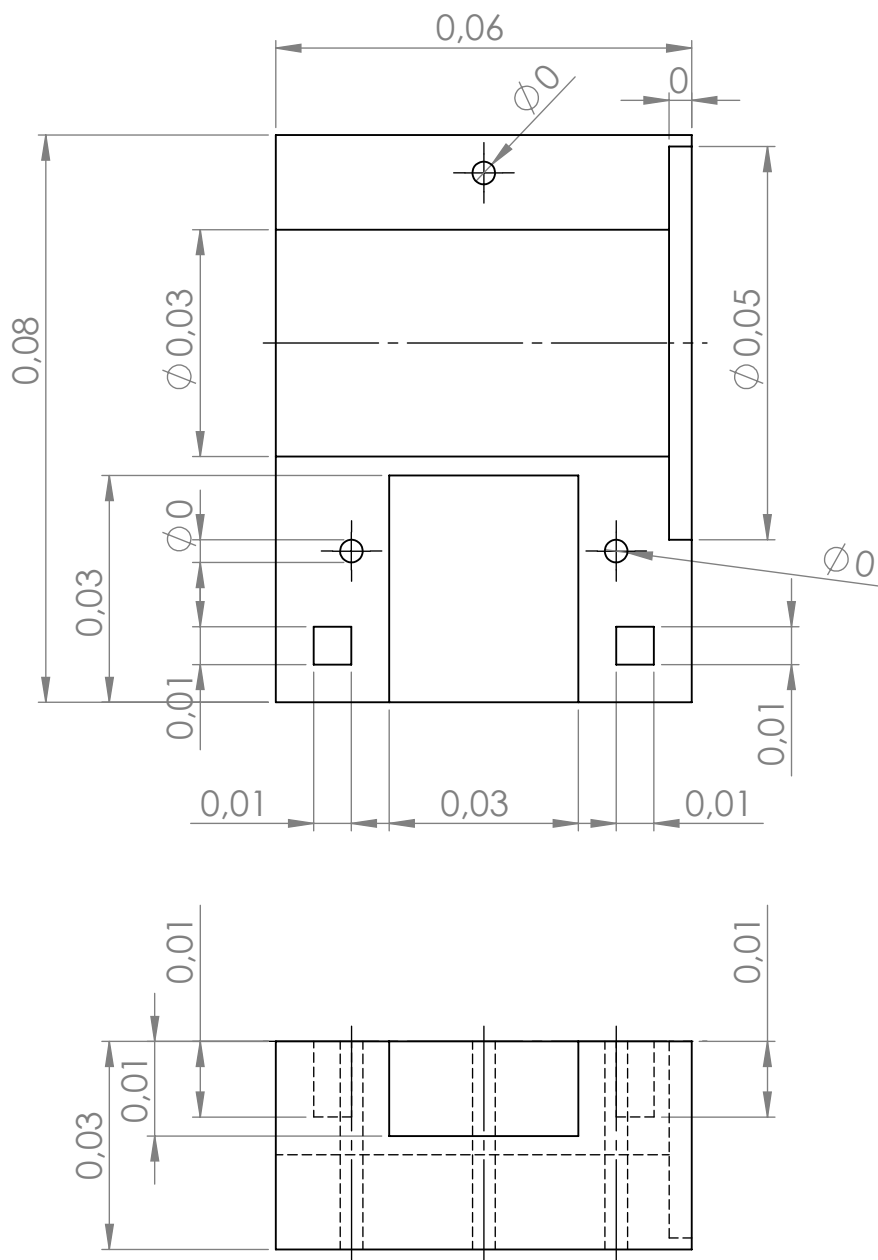
C

B

B

A

A



INGENIERO:		Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO:			
<h1>Cubo 2</h1>			
N.º DE DIBUJO		FIRMA:	
10			
ESCALA:1:1		UNIDADES: mm	

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

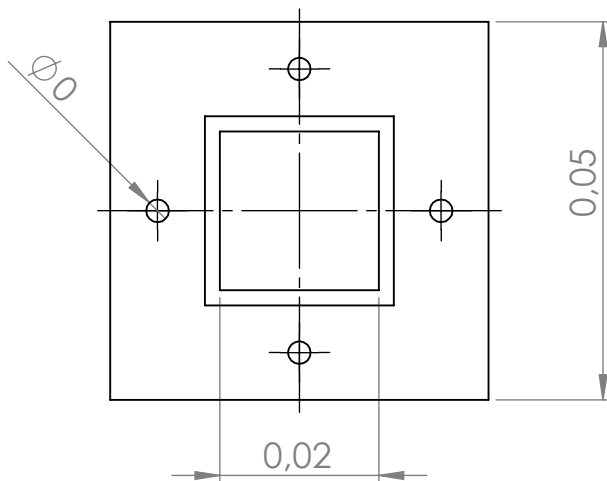
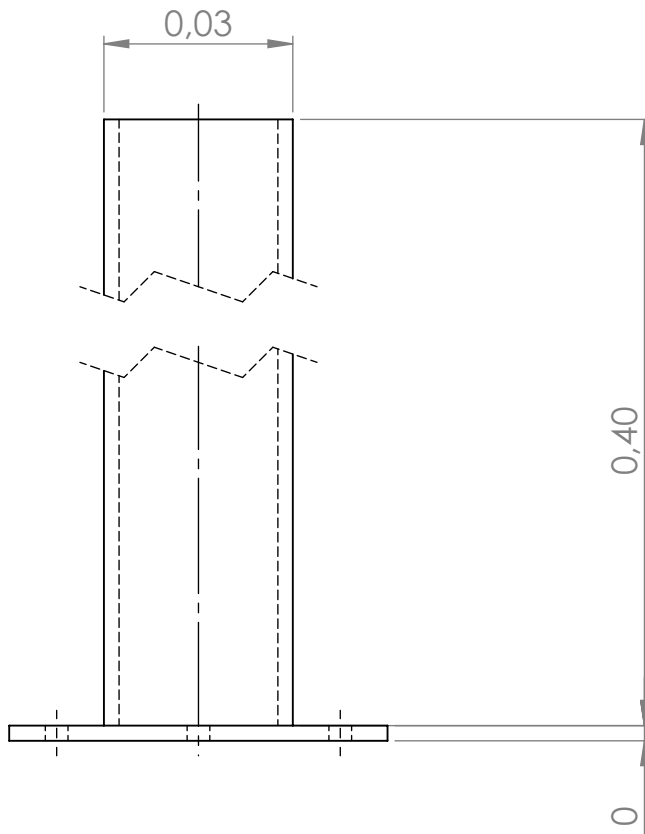
C

B

B

A

A



INGENIERO:		Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO:		Pata	
N.º DE DIBUJO	11	FIRMA:	
ESCALA:1:1		UNIDADES: mm	

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

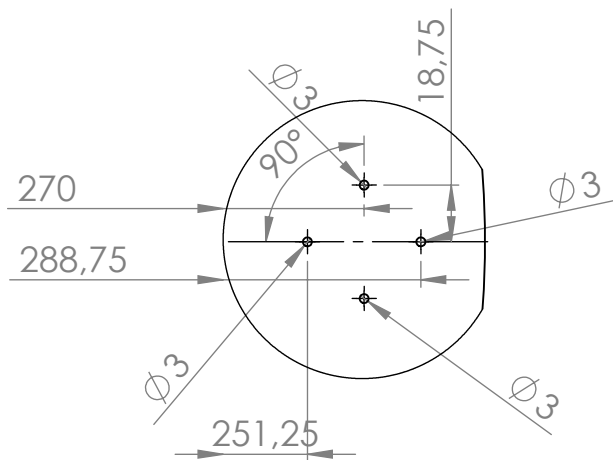
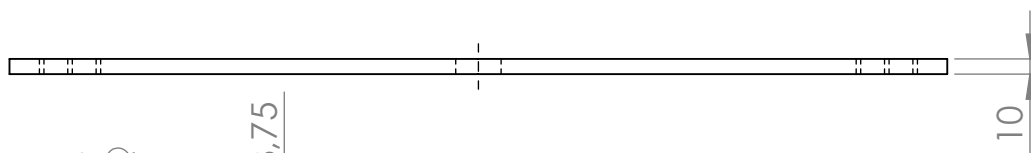
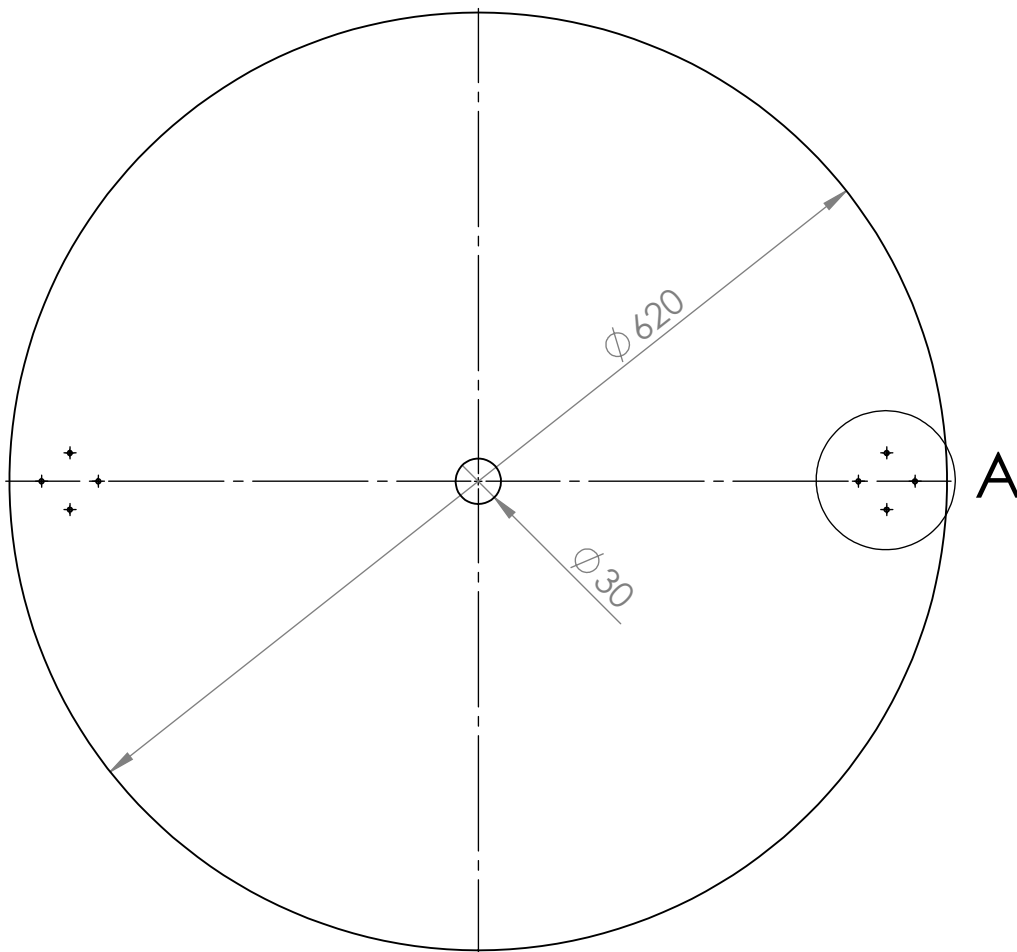
C

B

B

A

A



DETALLE A

ESCALA 2 : 5

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

INGENIERO: Alberto Javier Pemán Hernández

TÍTULO: Plato

N.º DE DIBUJO: 12

FIRMA:

ESCALA: 1:5

UNIDADES: mm

4

3

2

1

Capítulo 4

Planos de ensamblaje

4

3

2

1

F

F

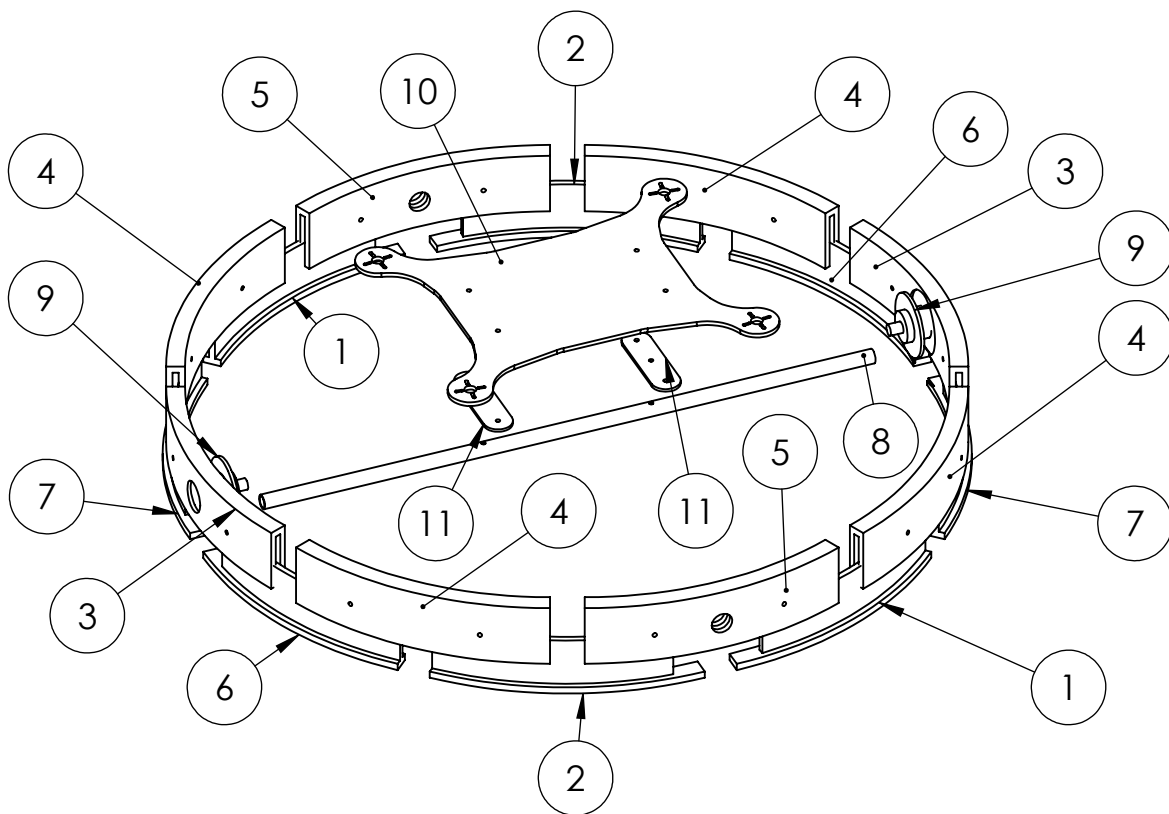
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Bajo derecha 1	2
2	Bajo izquierda 1	2
3	Cubierta 3	2
4	Cubierta 1	4
5	Cubierta 2	2
6	Bajo derecha 2	2
7	Bajo izquierda 2	2
8	Tubo aluminio	1
9	Anillo rozante 2	2
10	UAV	1
11	Pletina	2

E

E

D

D



C

C

B

B

INGENIERO:

Alberto Javier Pemán Hernández

TÍTULO:

Ensamblaje anillo

N.º DE DIBUJO

13

FIRMA:

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

ESCALA:1:5

UNIDADES: mm

A

A

4

3

2

1

4

3

2

1

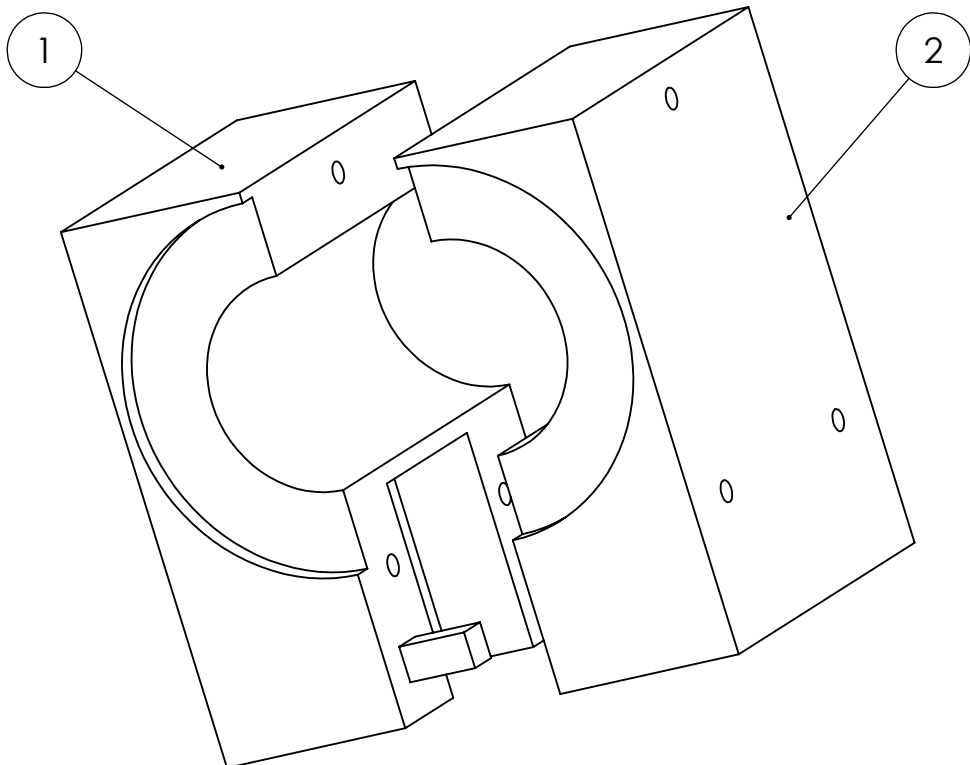
F

F

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Cubo 1	1
2	Cubo 2	1

E

E



D

D

C

C

B

B

A

A

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

INGENIERO: Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO: Ensamblaje cubo	
N.º DE DIBUJO 14	FIRMA:
ESCALA:1:1	UNIDADES: mm

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

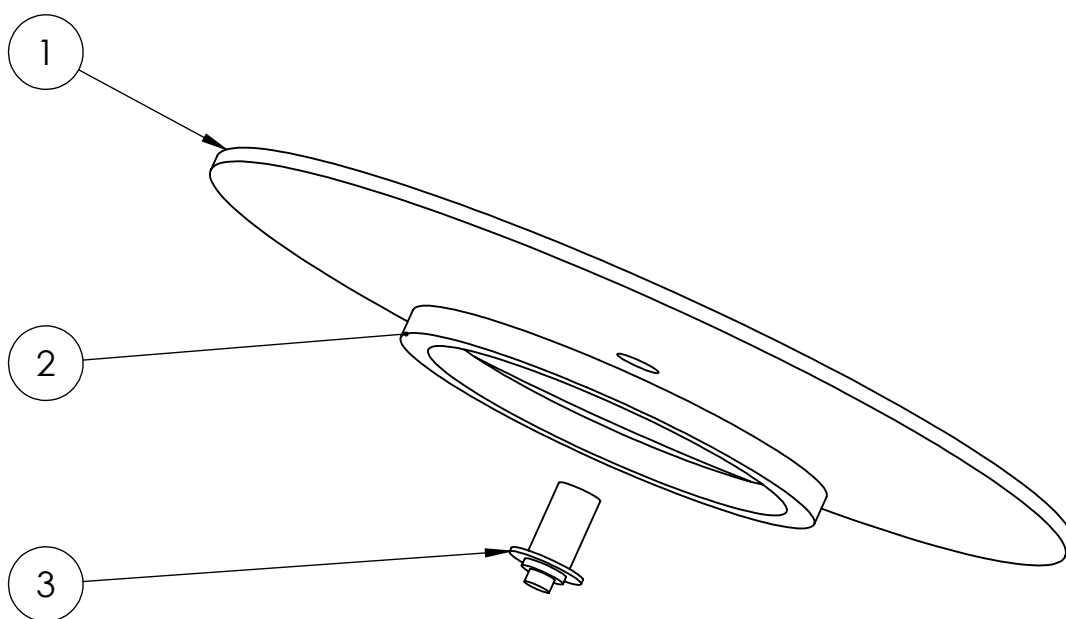
B

B

A

A

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Plato	1
2	Rodamiento plato	1
3	Anillo rozante 1	1



INGENIERO:

Alberto Javier Pemán Hernández

TÍTULO:

Ensamblaje plato

N.º DE DIBUJO

15

FIRMA:

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

ESCALA:1:5

UNIDADES: mm

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Ensamblaje cubo	2
2	Ensamblaje anillo	1
3	Ensamblaje plato	1
4	Pata	2
5	Anillo rozante 1	2

E

E

D

D

C

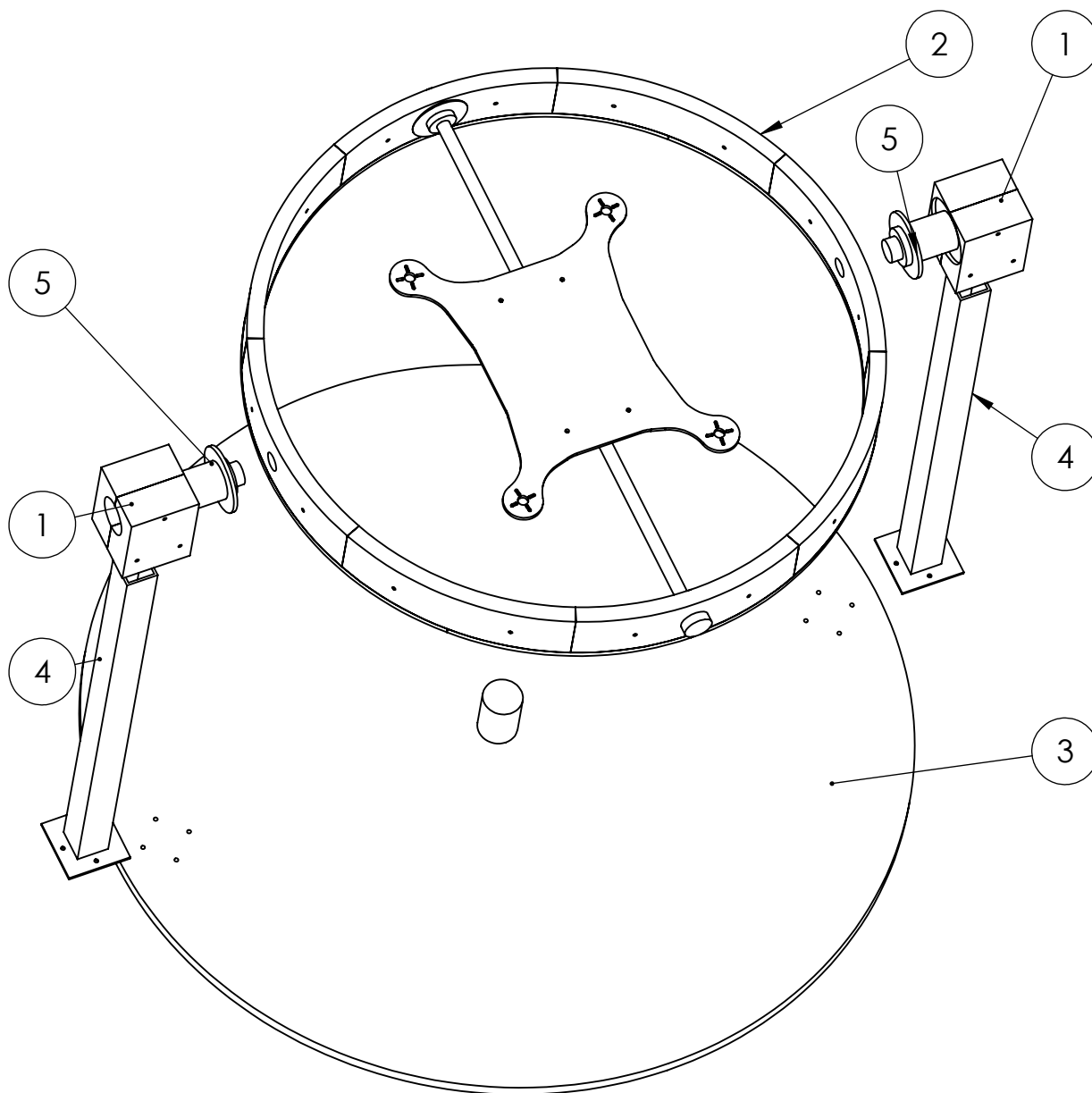
C

B

B

A

A



INGENIERO:

Alberto Javier Pemán Hernández

TÍTULO:

Ensamblaje completo

N.º DE DIBUJO

16

FIRMA:

ESCALA:1:5

UNIDADES: mm

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

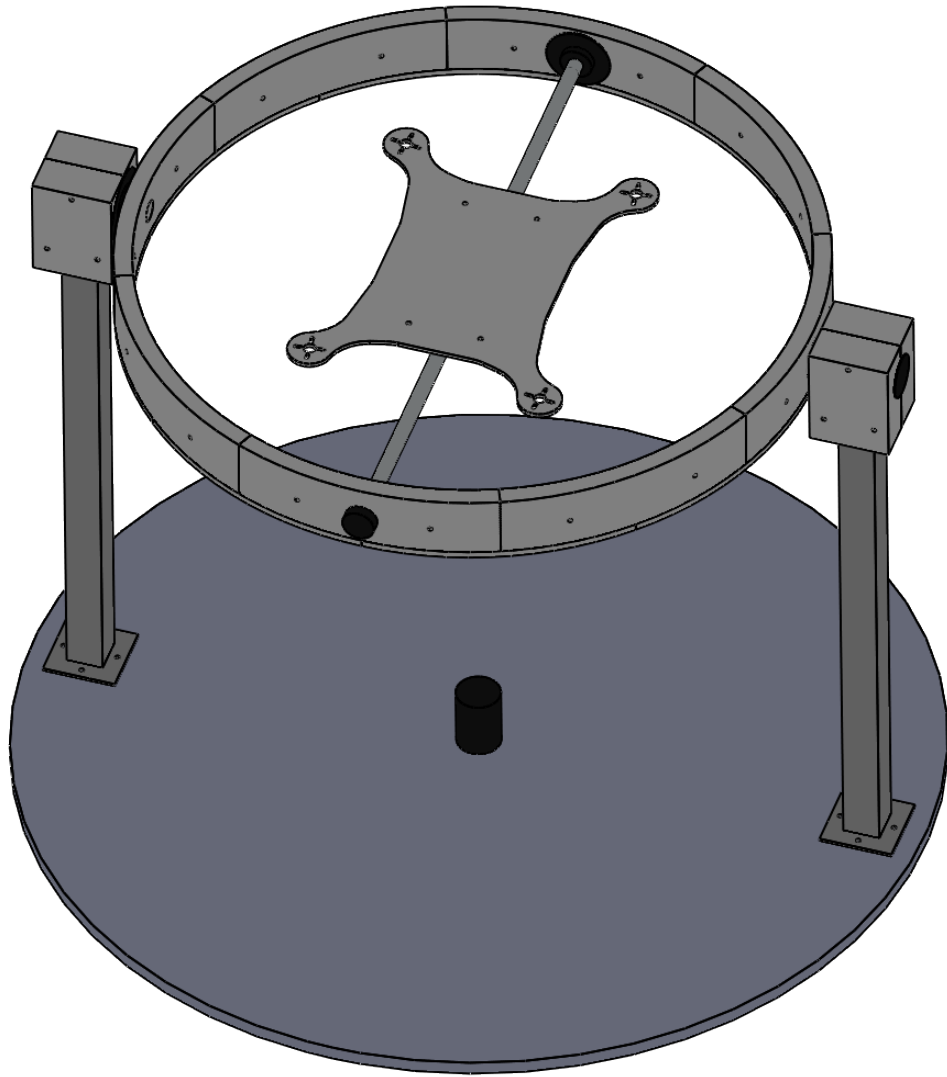
C

B

B

A

A



INGENIERO:		Alberto Javier Pemán Hernández	
TÍTULO:			
<h1>Ensamblaje final</h1>			
N.º DE DIBUJO		FIRMA:	
17			
ESCALA:1:5		UNIDADES: mm	

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

4

3

2

1



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Trabajo Final de Grado

Diseño de Base Giroscópica para el Análisis de Control de la Actitud de Cuadricópteros

PLIEGO DE CONDICIONES

Autor:

Alberto Javier Pemán Hernández

Director:

Sergio García-Nieto Rodríguez

Valencia, a 6 de julio de 2017

Índice general

1. Descripción de las obras	1
1.1. Unidades de obra	1
1.1.1. Diseño mediante CAD	1
1.1.2. Fabricación	2
1.1.3. Montaje	2
1.1.4. Validación	2
2. Condiciones Generales.	3
2.1. Disposiciones generales	3
2.1.1. Documentación del contrato de obra	3
2.2. Condiciones generales facultativas	4
2.2.1. Funciones a desarrollar por el contratista	4
2.2.2. Funciones a desarrollar por el ingeniero director	6
2.2.3. Libro de Órdenes	6
2.3. Condiciones generales de la ejecución	7
2.3.1. Ritmo de las obras	7
2.3.2. Orden de los trabajos	7
2.3.3. Ampliación del proyecto por causas imprevistas	7
2.3.4. Prórroga por causas de fuerza mayor	7
2.3.5. Condiciones generales de ejecución de los trabajos	7
2.3.6. Trabajos defectuosos	8
2.3.7. Defectos ocultos	8
2.3.8. Procedencia de materiales y aparatos	8
2.3.9. Materiales defectuosos	8
2.3.10. Pruebas y ensayos	8
2.3.11. Obras sin prescripciones	8
2.3.12. Recepción	9
2.4. Condiciones generales económicas	10
2.4.1. Principio general	10
2.4.2. Fianzas	10
2.4.3. Precios	11
2.4.4. Valoración de los trabajos	12
2.4.5. Penalizaciones	13

2.5. Condiciones legales generales	14
2.5.1. El contratista	14
2.5.2. El contrato	15
2.5.3. Arbitraje	15
3. Condiciones Particulares.	17
3.1. Condiciones técnicas particulares	17
3.1.1. Grupo 1: Diseño mediante CAD	18
3.1.2. Grupo 2: Fabricación	19
3.1.3. Grupo 3: Montaje del diseño	19
3.1.4. Grupo 4: Validación del diseño	19
3.2. Condiciones económicas particulares	20
3.3. Condiciones legales particulares	20
3.3.1. Perfil del contratista	20
3.3.2. Criterios de adjudicación	20
3.3.3. Plazos	21

Capítulo 1

Descripción de las obras

En el siguiente pliego de condiciones se hace referencia a las especificaciones técnicas, legales y económicas para la ejecución del presente proyecto. En concreto, en este apartado se enumeran las obras a ejecutar, estando las mismas descritas con mayor detalle en los posteriores capítulos del documento.

1.1. Unidades de obra

Las obras a ejecutar pueden ser agrupadas del siguiente modo:

- Diseño mediante CAD.
- Fabricación.
- Montaje.
- Validación.

1.1.1. Diseño mediante CAD

Este primer grupo funcional abarca el diseño en CAD de la base giroscópica y la decisión de hardware adicional necesario para la sensorización de la plataforma. De esta manera, las unidades de obra acogidas en este grupo son:

- Diseño de piezas para impresión 3D.
- Diseño de estructura metálica.
- Diseño de método de sensorización de la estructura.

1.1.2. Fabricación

Este grupo funcional comprende la fabricación y validación del diseño anterior mediante el uso de impresoras 3D de tal manera que se permita una alimentación externa de la plataforma. Así pues, las unidades de obra correspondientes a este grupo son:

- Impresión 3D de la estructura.
- Validación de la fabricación.

1.1.3. Montaje

Este grupo funcional comprende el montaje de las piezas fabricadas mediante impresión 3D, el montaje del frame de aluminio industrial y la alimentación del sistema. Así pues, las unidades de obra correspondientes a este grupo son:

- Montaje de estructura impresa en 3D.
- Montaje de estructura metálica.
- Sensorización de ambas estructuras.
- Montaje final de estructura completa.

1.1.4. Validación

Este grupo funcional comprende la ejecución de distintas pruebas como a las que sería sometido en el uso diario para validar el correcto funcionamiento del diseño y la correcta colección de datos. Así pues, las unidades de obra correspondientes a este grupo son:

- Ejecución de pruebas de esfuerzo sobre la estructura.
- Ejecución de pruebas de funcionamiento de la plataforma.

Capítulo 2

Condiciones Generales.

2.1. Disposiciones generales

La finalidad de este apartado consiste en regular la ejecución de las obras, delimitando los derechos y deberes que corresponden al constructor, al dueño de la obra, al ingeniero y aparejador, así como las relaciones entre todos ellos. En él se recogen los aspectos legales del proyecto y se fijan las condiciones que regirán la ejecución y puesta en marcha del mismo: características de los materiales, técnicas a emplear en la ejecución, controles de calidad exigidos, normas y leyes que rigen el proyecto. Constituye la especificación de carácter facultativo, económico y legal que regirá en el desarrollo de las obras.

2.1.1. Documentación del contrato de obra

El contrato de obra se encuentra formado por los siguientes documentos:

- Condiciones fijadas en el documento de contrato.
- Pliego de condiciones técnicas particulares.
- El presente pliego general de condiciones.
- El resto de documentación del proyecto.

Las órdenes e instrucciones de la dirección de la obra se incorporan al proyecto como interpretación o precisión de éste. En cada documento las especificaciones literales prevalecen sobre las gráficas y en los planos la cota prevalece sobre la medida a escala.

2.2. Condiciones generales facultativas

En este apartado se describen y regulan las relaciones entre la contrata y la dirección facultativa para la ejecución de las obras.

2.2.1. Funciones a desarrollar por el contratista

Corresponde al contratista de las obras:

- Organizar los trabajos, elaborar planos de obra que se precisen y autorizar las instalaciones provisionales y auxiliares de la obra.
- Observar la normativa vigente en cuanto a seguridad e higiene en el trabajo y velar por su cumplimiento.
- Ostentar la jefatura de todo el personal que intervenga en la obra y coordinar las intervenciones de los subcontratistas.
- Asegurar la idoneidad de todos y cada uno de los materiales utilizados, rechazando aquellos que no cuenten con las garantías exigidas por la normativa vigente o el presente pliego de condiciones.
- Poseer el libro de órdenes y seguimiento de la obra. Registrar todas las anotaciones que en él se efectúen a fin de que sean llevadas a cabo.
- Facilitar a la dirección facultativa los materiales para el cumplimiento de su cometido.
- Preparar los certificados parciales de obra y la propuesta de liquidación final.
- Suscribir con el promotor las actas de recepción provisional y definitiva.
- Concertar los seguros de accidentes de trabajo y de daños a terceros durante la obra. *Derechos y obligaciones.*
- Conocer las leyes y verificar los documentos del proyecto. El constructor deberá indicar que la documentación del proyecto le resulta suficiente para la comprensión de la obra o solicitar aclaraciones pertinentes.
- Elaborar el plan de seguridad e higiene para la aprobación por parte de la dirección facultativa.
- Habilitar en la obra oficinas para la consulta de planos y para los trabajos de la dirección facultativa. En dichas oficinas deberá hallarse la licencia de obras, el proyecto de ejecución completo, el libro de órdenes, el plan de seguridad e higiene, el libro de incidencias y la documentación de los seguros contratados.
- El constructor debe comunicar a la propiedad la persona designada como delegado suyo en la obra, el cual asumirá las funciones planas del constructor.

- El jefe de obra, o sus encargados, han de estar presentes durante la jornada de trabajo y acompañar al ingeniero o aparejador en las visitas a las obras, poniéndose a disposición de estos y suministrando los datos precisos para la comprobación de mediciones y liquidaciones.
- La contrata debe ejecutar los trabajos necesarios para la buena construcción y aspecto de las obras, aun cuando éstos no se hallen expresamente determinados, siempre que lo disponga el ingeniero dentro de los límites de las posibilidades de los presupuestos. Requiere reformado del proyecto con consentimiento de la propiedad toda variación que suponga el incremento de los precios de alguna unidad de obra en más del veinte por ciento (20%), o del total del presupuesto en un diez por ciento (10%).
- Las aclaraciones, interpretaciones y modificaciones de los preceptos del pliego de condiciones o de las indicaciones de los planos se comunicarán por escrito al constructor, debiendo éste devolver los originales comunicando el enterado mediante su firma al pie de todas las instrucciones, avisos u órdenes que reciba.
- El constructor podrá requerir del ingeniero o del aparejador o ingeniero técnico cuantas instrucciones o aclaraciones precise para la correcta ejecución del proyecto. Asimismo recibirá solución a los problemas técnicos no previstos en el proyecto que se pudieran presentar durante la ejecución de las obras.
- Las reclamaciones del contratista contra órdenes o instrucciones de la dirección facultativa las presentará ante la propiedad a través del ingeniero, si son de orden económico y de acuerdo con las condiciones estipuladas en el pliego de condiciones correspondiente. Contra disposiciones de orden técnico no podrá interponer reclamación alguna, pudiendo el contratista a fin de salvar su responsabilidad exponer razonablemente al ingeniero, el cual puede limitar su contestación al acuse de recibo.
- El contratista no podrá recusar al ingeniero, aparejador o ingeniero técnico o personal encargado por estos para el control de las obras, ni pedir la designación de otros facultativos para los reconocimientos o mediciones.
- En caso de desobediencia, manifiesta incompetencia o negligencia grave que comprometan o perturben la marcha de las obras, el ingeniero puede requerir al contratista que aparte a los operarios causantes de la perturbación.
- El contratista puede subcontratar capítulos o unidades de obra con sujeción a lo estipulado en el pliego de condiciones y sin perjuicio de sus obligaciones como contratista general de la obra.
- El contratista no iniciará una unidad de obra sin la autorización de la dirección.
- El contratista está obligado a cumplir las indicaciones del libro de órdenes.

2.2.2. Funciones a desarrollar por el ingeniero director

Es el máximo responsable de la ejecución del proyecto, decide sobre el comienzo, ritmo y calidad de los trabajos. Velará por el cumplimiento de los mismos y por las condiciones de seguridad del personal de la obra. Las funciones que corresponden al ingeniero director son:

- Redactar los complementos o rectificaciones del proyecto que se precisen.
- Asistir a las obras las veces que la naturaleza y complejidad de las mismas requieran a fin de resolver las contingencias que se produzcan e impartir las instrucciones necesarias.
- Coordinar la intervención en obra de otros técnicos.
- Aprobar certificaciones parciales de obra, la liquidación final y asesorar al promotor en el acto de la recepción.
- Preparar la documentación final de la obra, expedir y suscribir junto con el aparejador o ingeniero técnico el certificado final de la misma.
- Comprobar instalaciones provisionales, medios auxiliares y sistemas de seguridad e higiene en el trabajo.
- Ordenar y dirigir la ejecución con arreglo al proyecto, normas técnicas y reglas de la buena construcción.
- Realizar o disponer de las pruebas y ensayos de materiales, instalaciones y demás unidades de obra según el plan de control, así como los controles necesarios para asegurar la calidad constructiva de acuerdo con el proyecto y la normativa técnica aplicable.
- Informar al constructor de los resultados de las pruebas e impartir, en su caso, las órdenes oportunas.
- Planificar el control de calidad y el control económico de las obras.

2.2.3. Libro de Órdenes

Es obligatoria la existencia a pie de obra de un libro de órdenes e incidencias, visado por los colegiados profesionales correspondientes donde se recogerán las órdenes y modificaciones que se dicten en cada momento.

2.3. Condiciones generales de la ejecución

2.3.1. Ritmo de las obras

El instalador o contratista iniciará las obras en el plazo marcado por el pliego de condiciones particulares, desarrollándolas para que queden ejecutados los trabajos dentro de los periodos parciales establecidos y así ejecutar la obra dentro del plazo exigido en el contrato.

El contratista dará cuenta por escrito al ingeniero del comienzo de los trabajos con, al menos, tres días de antelación.

2.3.2. Orden de los trabajos

La determinación del orden de los trabajos es facultad de la contrata, salvo en casos que por circunstancias técnicas estime conveniente su variación la dirección facultativa.

2.3.3. Ampliación del proyecto por causas imprevistas

Cuando haya que ampliar el contrato, bien por motivos imprevistos o razones de fuerza mayor, no se interrumpirán los trabajos, continuándose según las instrucciones dadas por el ingeniero en cuanto se formule o tramita el proyecto reformado. El constructor deberá realizar los trabajos necesarios de carácter urgente, anticipando ese servicio, el cual le será consignado en un presupuesto adicional o abonado directamente.

2.3.4. Prórroga por causas de fuerza mayor

Si por causas de fuerza mayor o independiente de la voluntad del constructor no pudiesen iniciarse las obras, o fuesen suspendidas o no se acabasen en los plazos prefijados, se otorgará una prórroga para el cumplimiento de la contrata previo informe favorable del ingeniero.

2.3.5. Condiciones generales de ejecución de los trabajos

Los trabajos se ejecutarán con estricta sujeción al proyecto, a las modificaciones del mismo que hayan sido aprobadas y a las órdenes e instrucciones que entreguen por escrito bajo su responsabilidad el ingeniero o el aparejador o ingeniero técnico.

2.3.6. Trabajos defectuosos

El constructor deberá emplear materiales que cumplan con las condiciones exigidas en las condiciones técnicas generales y particulares del pliego de condiciones y realizar los trabajos de acuerdo con lo especificado en el pliego. Hasta la recepción definitiva es el responsable de la ejecución y de los defectos derivados de una mala ejecución. Por esto, cuando el aparejador o ingeniero técnico advierta defectos en los trabajos, o que los materiales o los dispositivos colocados no reúnen las condiciones exigibles, entonces antes de la recepción de la obra podrá disponer la reposición de las partes defectuosas.

2.3.7. Defectos ocultos

Si el aparejador tiene fundadas razones para creer en la existencia de defectos ocultos de construcción, ordenará efectuar antes de la recepción definitiva los ensayos que crea conveniente para reconocer los trabajos que suponga defectuosos. Pagará los ensayos el constructor si existe y la propiedad si no existe éste.

2.3.8. Procedencia de materiales y aparatos

El constructor se proveerá de materiales y aparatos de todas clases en los puntos que le parezcan convenientes excepto en los casos en que el pliego de condiciones preceptúe una procedencia determinada. El constructor deberá informar al aparejador de la idoneidad y procedencia de los mismos. A petición del ingeniero, el constructor presentará muestras de los materiales.

2.3.9. Materiales defectuosos

El ingeniero a instancias del aparejador dará orden al constructor de sustituir los materiales y aparatos defectuosos por otros que satisfagan las condiciones de calidad exigidas en el presente pliego de condiciones. Si el constructor no los retirara lo hará la propiedad, cargando los gastos a la contrata.

2.3.10. Pruebas y ensayos

Los gastos ocasionados por pruebas y ensayos corren por cuenta de la contrata, pudiéndose repetir aquellos que no ofrezcan las suficientes garantías.

2.3.11. Obras sin prescripciones

En aquellos trabajos para los que no existan prescripciones en el presente pliego ni en la documentación restante, el constructor se atendrá a las instrucciones que dicte la dirección facultativa.

2.3.12. Recepción

Recepción provisional

Tres días antes de dar fin a las obras, el ingeniero comunicará a la propiedad la proximidad de la terminación a fin de convenir la fecha para el acto de recepción provisional. Ésta se realiza con la participación de la propiedad, el aparejador, el constructor y el ingeniero. Se practicará un detenido reconocimiento de las obras, se extenderá un acta para cada interviniente firmada por todos ellos. Desde esta fecha corre el periodo de garantía si las obras son admitidas. Seguidamente los técnicos de la dirección facultativa extenderán el certificado de final de la obra. En caso de estar acabado se darán las instrucciones para remediar los defectos, fijando un plazo para subsanarlos, pasado el cual se hará un nuevo reconocimiento.

Documentación final de la obra

El ingeniero director facilitará a la propiedad la documentación final con las especificaciones y contenidos dispuestos por la legislación vigente.

Medición definitiva y liquidación provisional

Recibidas las obras, se procederá por parte del aparejador a su medición definitiva, con la existencia del constructor. Se extenderá la oportuna certificación por triplicado, que aprobada por el ingeniero con su firma servirá para el abono por parte de la propiedad del saldo resultante menos la cantidad retenida como fianza.

Recepción definitiva

Se verificará después del plazo de garantía, el cual se especifica en el pliego de condiciones particulares y nunca será inferior a nueve meses. A partir de esta fecha cesa la obligación del constructor de reparar desperfectos propios de la normal conservación de la obra.

Prórroga de garantía

Si la obra no se encuentra en las condiciones debidas se aplazará la recepción definitiva. El ingeniero director indicará al constructor los plazos para realizar las obras necesarias. De no cumplirse estos plazos perderá la fianza.

Recepciones de trabajos cuya contrata ha sido rescindida

En caso de resolución del contrato, el contratista deberá retirar las herramientas, medios auxiliares, etcétera, en el plazo indicado en el pliego de condiciones y dejar la obra en condiciones de ser reanudada por otra empresa. Los trabajos terminados se recibirán provisionalmente, y definitivamente una vez transcurrido el periodo de garantía.

2.4. Condiciones generales económicas

2.4.1. Principio general

En este apartado se describen y regulan las relaciones económicas entre la propiedad y la contrata, así como la función de control de la dirección facultativa. Todos los intervinientes en el proceso de construcción tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación con arreglo a las condiciones contractuales establecidas.

La propiedad, el contratista y los técnicos pueden exigirse recíprocamente las garantías adecuadas al cumplimiento puntual de sus obligaciones de pago.

2.4.2. Fianzas

La fianza es el porcentaje del valor total de las obras que debe depositar la contrata como garantía a la firma del contrato. El contratista presentará las siguientes fianzas:

- Depósito en metálico o aval bancario por importe del diez por ciento (10 %) del precio total de la contrata, salvo especificación contraria en el contrato.
- Retención de un cinco por ciento (5 %) en las certificaciones parciales o pagos que se van librando.

Con cargo a la fianza se aplican las penalizaciones por demoras y las reparaciones con cargo a la contrata. Si el contratista se negase a realizar los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, el ingeniero en representación del propietario ordenará su ejecución a un tercero, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones que el propietario lleve a cabo en caso de que el importe de la fianza no cubra el importe de los gastos. La fianza será devuelta al contratista en un plazo inferior a 30 días después de firmar el acta de recepción definitiva de la obra. La propiedad podrá exigir que el contratista acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la misma.

2.4.3. Precios

Composición de los precios

El cálculo de los precios es el resultado de sumar los costes directos, los indirectos, los gastos generales y el beneficio industrial.

Los costes directos son:

- Mano de obra con pluses, cargas y seguros sociales que intervienen directamente.
- Los materiales a los precios resultantes a pie de obra que sean necesarios para su ejecución.
- Equipos y sistemas técnicos de seguridad e higiene para prevención y protección de accidentes.
- Gastos de personal, combustible y energía derivados del funcionamiento de la maquinaria e instalaciones utilizadas en la ejecución de la unidad de obra.

Los costes indirectos son:

- Gastos de instalación de oficinas a pie de obra, comunicaciones, edificación de almacenes, talleres, seguros, personal administrativo adscrito a la obra. Se cifran como porcentaje de los costes directos e indirectos.

El beneficio industrial:

- El beneficio del contratista se establece en un seis por ciento (6%) sobre la suma de las anteriores partidas.
- Precio de ejecución material.
- El resultado obtenido por la suma de las anteriores partidas exceptuando el beneficio industrial.

El precio de contrata:

- Es la suma de costes directos, indirectos y beneficio industrial. El IVA se aplica a este precio pero no lo integra.

Precios contradictorios

Se producen cuando la propiedad mediante el ingeniero introduce unidades o cambios de calidad en algunas de las unidades previstas o bien es necesario afrontar situaciones imprevistas. El contratista está obligado a efectuar los cambios. El precio se resolverá entre el contratista y el ingeniero antes de comenzar la ejecución de los trabajos. Si el contratista no reclama los precios antes de la firma del contrato, no podrá reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro de presupuesto que sirve de base para la ejecución.

Revisión de precios contratados

No se admite la revisión de los precios si el incremento de los mismos en las unidades que faltan por realizar no alcanza un montante superior al tres por ciento (3%) del valor total del presupuesto del contrato. Ante variaciones al alza se efectúa la revisión de acuerdo con la fórmula establecida en el pliego de condiciones particulares. El contratista percibe la diferencia que resulte por variación del IPC superior al tres por ciento (3%). Se aplicará alguna de las fórmulas de revisión propuestas en la Ley de Contratos del Estado.

2.4.4. Valoración de los trabajos

Formas de abono

Salvo indicación contraria en el pliego de condiciones particulares, el abono de los trabajos se efectuará de una de las siguientes formas:

- Tipo fijo tanto alzado por unidad de obra, con el precio invariable fijado de antemano, pudiendo variar únicamente el número de unidades ejecutadas previa medición y aplicando al total de unidades de obra ejecutadas el precio fijado.
- Tanto variable por unidad de obra, según las condiciones en que se realice y los materiales empleados en su ejecución de acuerdo con las órdenes del ingeniero director.
- Mediante listas de jornales y recibos de materiales realizados en la forma que el pliego general de condiciones económicas determina.
- Por hora de trabajo según las condiciones determinadas en el contrato.

Certificaciones

En cada fecha que se indique en el contrato o en los pliegos de condiciones particulares, el contratista formará una relación valorada de las obras ejecutadas durante los plazos según las mediciones efectuadas por el aparejador.

El contratista puede presenciar las mediciones necesarias para la elaboración de la relación, así mismo, el aparejador o ingeniero técnico enviará al contratista los resultados de las mediciones para que éste los examine y los devuelva firmados con su conformidad o efectuar las oportunas reclamaciones. El ingeniero aceptará o rechazará las reclamaciones dando cuenta al contratista de su resolución, pudiendo éste reclamar al propietario contra la resolución del ingeniero.

A partir de la relación valorada, el ingeniero expedirá la certificación de obras ejecutadas. La certificación se remitirá al propietario en el periodo de un mes posterior al que

referencia la certificación y tendrá el carácter de documento sujeto a variaciones derivadas de la liquidación final, no suponiendo dichas certificaciones aprobación ni recepción de las obras que comprenden.

Mejora de obras

Cuando el contratista, incluso con la autorización del ingeniero director, emplee materiales de mayor calidad, fábrica de mayor precio u obra de mayores dimensiones, únicamente tendrá derecho a percibir lo que le corresponde en caso de haber construido la obra con sujeción a lo proyectado o adjudicado.

Pagos

Los pagos los efectuará el propietario en los plazos previamente establecidos y su importe corresponderá al de las certificaciones de obra conformadas por el ingeniero director.

Trabajos ejecutados durante el periodo de garantía

El abono de estos trabajos se procederá de la siguiente forma:

- Si los trabajos están especificados en el proyecto y no fueron realizados a su debido tiempo, estos serán valorados a los precios que figuren en el presupuesto y abonados de acuerdo a lo establecido en el proyecto.
- Si los trabajos tienen como objetivo la reparación de desperfectos ocasionados por el uso, éstos se abonarán a los precios del día previamente acordados.
- Si el objeto de los trabajos es la reparación de desperfectos ocasionados por deficiencias de la instalación o de la calidad de los materiales, no se abonará nada al contratista.

2.4.5. Penalizaciones

Existen 3 tipos de penalizaciones: por demora en la ejecución, por incumplimiento de contrato y por demora de pagos.

Por retraso no justificado en el plazo de terminación

La indemnización por retraso no justificado en la terminación de las obras se establecerá en un cinco por ciento (5%) del importe total de los trabajos contratados por día natural de retraso a partir del día de terminación fijado. Esta cantidad será descontada y

retenida con cargo a la fianza. No se computan como días perdidos los debidos a razones de fuerza mayor como huelgas, catástrofes o causas administrativas.

Penalización por incumplimiento de contrato

Se establecerá en las condiciones del contrato una penalización por incumplimiento de contrato o mala ejecución de los trabajos.

Demora en los pagos

Si el propietario no efectuase el pago dentro del mes siguiente al plazo convenido, el contratista tendrá el derecho de percibir el abono de un cuatro y medio por ciento anual en concepto de intereses de demora. Si pasasen dos meses a partir del término de dicho plazo, el contratista tiene derecho a la resolución del contrato, precediéndose a la liquidación de las obras ejecutadas y materiales acopiados.

2.5. Condiciones legales generales

Ambas partes se comprometen en sus diferencias al arbitrio de amigables componedores.

2.5.1. El contratista

El contratista es el responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el contrato y en los documentos del proyecto excluida la memoria. Por tanto está obligado a deshacer y volver a hacer todo lo mal ejecutado durante las obras aunque estas partidas hayan sido abonadas. Asimismo, se obliga a lo establecido en la ley de contratos de trabajo y dispuesto en la de accidentes de trabajo, subsidio familiar y seguros sociales.

El contratista se responsabiliza de los accidentes que se produzcan por inexperiencia o descuido donde se efectúan las obras y en las contiguas. Será el único responsable y correrá de su cuenta el abono de las indemnizaciones puesto que se excluyen en los precios los gastos para seguros y medidas de seguridad.

Corre a cargo de la contrata el pago de impuestos y arbitrios municipales cuyo abono deba efectuarse durante el tiempo de ejecución de las obras y por concepto inherente a las obras.

El contratista tiene derecho, a su costa, de sacar copias de planos, presupuestos, pliego de condiciones y demás documentos del proyecto.

Serán causas de recesión del contrato:

- Muerte o incapacidad del contratista.
- La quiebra del contratista.
- Alteraciones del contrato por:
 - Modificaciones del proyecto con alteraciones fundamentales a juicio del ingeniero director, y siempre que alguna modificación represente como mínimo el cuarenta por ciento (40%) del valor de alguna de las unidades del proyecto modificadas.
 - Modificación de las unidades de obra, siempre que representen el cuarenta por ciento (40%) como mínimo de alguna de las unidades modificadas.
- La suspensión de la obra comenzada y el no comienzo de las obras en tres (3) meses a partir de la adjudicación. Se procederá a devolver la fianza.
- No comenzar los trabajos dentro del plazo señalado en las condiciones del contrato o del proyecto.
- El incumplimiento de las condiciones del contrato cuando suponga descuido o mala fe con perjuicio de los intereses de la obra.
- El abandono de la obra sin causa justificada.

2.5.2. El contrato

El contrato se establece entre la propiedad o promotor y el contratista. Existen varias modalidades:

- A precio alzado: se estipula una cantidad para las obras que no se modificará aunque el volumen de las obras se modifique.
- Contrato por unidades de obra.

2.5.3. Arbitraje

En casos de litigio o desavenencia entre la propiedad y la contrata se recurrirá en primer lugar a la dirección facultativa de la obra. En caso que el desacuerdo subsista, cada parte nombrará un perito, sometiéndose las partes al acuerdo entre éstos. En última instancia se acudirá a los tribunales.

Capítulo 3

Condiciones Particulares.

En el presenta capítulo se especificarán las condiciones técnicas, económicas y legales de carácter particular a las que se ha de someter el proyecto.

3.1. Condiciones técnicas particulares

Son objeto de la especificación las características que han de tener los materiales necesarios, los controles de calidad, así como las pruebas y ensayos a las que se verán sometidos.

La organización de este apartado se realizará en base al orden cronológico en el que se deberán ejecutar los diferentes grupos de unidades de obra. Por tanto, para la realización de cada grupo de unidades de obra descrito es necesario que antes hayan sido realizadas todas las unidades de obra descritas anteriormente.

En base a este criterio, las obras se organizan como se muestra a continuación:

- Diseño mediante CAD:
 - Diseño de piezas para impresión 3D.
 - Diseño de estructura metálica.
 - Diseño de método de alimentación de la estructura.
- Fabricación
 - Impresión 3D de la estructura.
 - Validación de la fabricación.
- Montaje
 - Montaje de estructura impresa en 3D.
 - Montaje de estructura metálica.

- Cableado de ambas estructuras
 - Montaje final de la estructura completa.
- Validación
- Ejecución de pruebas de esfuerzo sobre la estructura.
 - Ejecución de pruebas de colección de datos.

3.1.1. Grupo 1: Diseño mediante CAD

Se deberán llevar a cabo todas las obras referentes al diseño de una base giroscópica en la cual se pueda acoplar un UAV cuatrirotor. Por un lado, será necesario el diseño de las piezas que se deban imprimir en 3D, piezas que forman el aro de la plataforma y que unen a este con la estructura metálica. Por otro lado, será necesario la selección de los perfiles de hierro que se usarán para la sujeción del aro así como la elección de la base, los rodamientos y los anillos rozantes necesarios. Además, se deberá escoger el hardware de sensorización que necesitará la plataforma.

A continuación se describen con detalle las condiciones de los materiales y de ejecución de las unidades de obra asociadas a cada grupo:

Diseño de piezas para impresión 3D

- Aro:
- Pieza de cubierta que acople el stator del anillo rozante por el interior: pieza que permita acoplar el anillo rozante por el interior del aro. Para mayor detalle ver plano 8.
 - Pieza de cubierta que acople el rotor del anillo rozante por el exterior: se trata de una pieza impresa en 3D que permita acoplar el rotor de un anillo rozante por el exterior de la misma. Para mayor detalle ver plano 7.
 - Pieza de cubierta: pieza de cubierta sin necesidad de acoplar ningún elemento. Para mayor detalle ver plano 6.
 - Pieza base izquierda: pieza de base en forma de “T” con sección vacía a la izquierda. Para mayor detalle ver plano 4.
 - Pieza base derecha: pieza de base en forma de “T” con sección vacía a la derecha. Para mayor detalle ver plano 2.
 - Pieza base izquierda acople anillo rozante: pieza de base en forma de “T” con sección vacía a la izquierda y rebaje en la sección que solapa con el anillo rozante. Para mayor detalle ver plano 5.

- Pieza base derecha acople anillo rozante: pieza de base en forma de “T” con sección vacía a la derecha y rebaje en la sección que solapa con el anillo rozante. Para mayor detalle ver plano 3.
 - Piezas de acople entre frame y anillo rozante. Para mayor detalle ver planos 9 y 10.
- Base dron: pieza impresa en 3D que acople los cuatro motores y la placa base mediante la cual se ejecutará el control de los motores. Para mayor detalle ver plano 1.

Diseño estructura metálica

- Frame metálico: elección y diseño de las columnas metálicas que soportarán el aro. Para mayor detalle ver plano 11.

3.1.2. Grupo 2: Fabricación

Una vez realizadas las obras con respecto al diseño de la estructura se debe realizar la fabricación de la misma.

- Impresión 3D de la estructura: mediante una impresora 3D se fabricarán todas las piezas descritas anteriormente.
- Fabricación de estructura metálica: soldado de perfil cuadrado a una placa cuadrada que hará de base.
- Validación de la fabricación: se validará la fabricación de la estructura de manera visual.

3.1.3. Grupo 3: Montaje del diseño

Cuando todas las piezas hayan sido validadas un operario ensamblará todas las piezas fabricadas tal y como se especifica en los planos del ensamblaje.

3.1.4. Grupo 4: Validación del diseño

Una vez haya sido montada la base giroscópica se validará el diseño de las siguientes maneras.

- Validación estructural: el diseño se someterá a distintas cargas (similares a las que pueda ser sometido en su uso diario) y se validará su resistencia estructural.
- Validación de recogida de datos y funcionamiento: se comprobará que el diseño funcione correctamente.

3.2. Condiciones económicas particulares

La duración del contrato será de un año. El pago al contratista se realizará en cuatro plazos. El primero se efectuará en el momento de la firma del contrato y su cuantía será del cuarenta por ciento (40 %) del precio fijado para la realización del proyecto. El segundo y tercer pago se abonarán en el cuarto y octavo mes respectivamente, contados desde la fecha del primer pago. La cuantía a abonar en cada caso será el veinte por ciento (20 %) del precio total fijado. El último pago se formalizará tres meses después de la expiración del contrato. Se deberá abonar el veinte por ciento (20 %) restante del precio total. Este último abono en diferido supondrá una garantía al promotor del proyecto en el caso de que una vez finalizado el contrato se detecten errores de fabricación del producto.

3.3. Condiciones legales particulares

3.3.1. Perfil del contratista

Para que el contratista pueda optar a la adjudicación del contrato del presente proyecto, deberá satisfacer, además de lo expuesto en el apartado uno, los siguientes requisitos mínimos:

- El precio propuesto por el contratista no deberá superar en ningún caso el veinte por ciento (20 %) de la cantidad indicada en el documento “Presupuesto”.
- Deberá contar, como mínimo, un graduado en ingeniería aeroespacial en su plantilla de empleados.

Asimismo, se valorará positivamente el programa social de la empresa especialmente en los puntos concretados a continuación:

- Participación de la empresa en programas de becas de prácticas de formación para alumnos de grados universitarios o ciclos formativos, así como para alumnos recién titulados.
- Disposición de un certificado de sostenibilidad medioambiental.

3.3.2. Criterios de adjudicación

La adjudicación del contrato se regirá por los criterios especificados en la tabla 3.1:

El contrato se adjudicará a la oferta que presente la puntuación más elevada, la cual será computada con la suma de los puntos obtenidos para cada concepto.

Tabla 3.1: Puntuaciones en la asignación de la contrata.

Concepto	Puntuación
Precio	Precio mínimo ofertado: 60 Segundo precio mínimo: 45 Tercer precio mínimo: 20 Superiores al tercer precio mínimo: 0
Años de experiencia en diseño con CAD	Más de 10 años: 40 Entre 5 y 9 años: 30 Entre 1 y 4 años: 15 Inferior a 1 año: 0
Años de experiencia en control de cuatrirrotores	Más de 10 años: 20 Entre 5 y 9 años: 15 Entre 1 y 4 años: 8 Inferior a 1 año: 0
Programa social de la empresa (ver 3.3.1)	Cumple con todos los puntos: 5 Cumple con 2 puntos: 3 Cumple con 1 punto: 2.5 No cumple con ninguno: 0

3.3.3. Plazos

Plazo de pruebas

El contratista dispone de un plazo máximo de sesenta (60) días hábiles, contados a partir del día siguiente al de la formalización de contrato, para adaptar sus instalaciones a la ejecución del proyecto y fabricar como mínimo un total cinco (5) unidades del producto. En ese momento, la Dirección Facultativa realizará un exhaustivo control de calidad sobre las unidades en el que se evaluará el cumplimiento de todas las especificaciones técnicas presentadas en el apartado 3.1.

Si el resultado del control no es favorable, el contratista dispondrá de un plazo adicional de treinta (30) días hábiles, contados a partir de la entrega de los resultados de la prueba, para corregir aquellos problemas detectados y fabricar como mínimo un total de cinco (5) unidades del producto. Las mismas, serán nuevamente examinadas por la Dirección Facultativa. En el supuesto de unos resultados nuevamente desfavorable, la Dirección Facultativa se reserva el derecho a rescindir el contrato acordado con el contratista.

Si los resultados del control son favorables, el plazo de pruebas se dará por finalizado y se iniciará con normalidad la ejecución de las obras. Los plazos de finalización y entrega serán siempre superiores a 90 días y se comunicarán por escrito al constructor, debiendo éste devolver los originales comunicando el enterado mediante su firma al pie de todas las instrucciones, avisos u órdenes que reciba.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Trabajo Final de Grado

Diseño de Base Giroscópica para el Análisis de Control de la Actitud de Cuadricópteros

PRESUPUESTO

Autor:

Alberto Javier Pemán Hernández

Director:

Sergio García-Nieto Rodríguez

Valencia, a 6 de julio de 2017

Índice general

1. Introducción	1
2. Precio Mano De Obra	3
3. Precios de Materiales	5
4. Precios de Maquinaria	7
5. Precios Unitarios	9
6. Precios descompuestos	11
6.1. Cálculo de horas por tarea	11
6.1.1. Grupo 1: Diseño mediante CAD	11
6.1.2. Grupo 2: Fabricación	11
6.1.3. Grupo 3: Montaje	12
6.1.4. Grupo 4: Validación	12
6.2. Precios descompuestos	12
6.2.1. Grupo 1: Diseño mediante CAD	12
6.2.2. Grupo 2: Fabricación	13
6.2.3. Grupo 3: Montaje	13
6.2.4. Grupo 4: Validación	14
7. Presupuesto parcial	15
8. Presupuesto de ejecución material, de inversión y de licitación	17

Índice de tablas

2.1. Precio mano de obra parta a)	3
2.2. Precio mano de obra parte b)	3
3.1. Tabla de materiales	5
4.1. Precios de maquinaria	7
5.1. Diseño mediante CAD	9
5.2. Fabricación	9
5.3. Montaje	9
5.4. Validación	10
6.1. Tiempo dedicado al diseño mediante CAD	11
6.2. Tiempo dedicado a la fabricación	11
6.3. Tiempo dedicado al montaje	12
6.4. Tiempo dedicado a la validación	12
6.5. Diseño de estructura para impresión 3D.	12
6.6. Diseño de estructura metálica.	12
6.7. Diseño de método de sensorización de la estructura.	13
6.8. Impresión 3D de la estructura	13
6.9. Validación de la fabricación	13
6.10. Montaje de la estructura impresa en 3D	13
6.11. Montaje de estructura metálica	13
6.12. Cableado de ambas estructuras	14
6.13. Montaje final de estructura completa	14
6.14. Ejecución de pruebas de esfuerzo sobre la estructura.	14
6.15. Ejecución de pruebas de colección de datos y funcionamiento.	14
7.1. Presupuesto parcial de diseño mediante CAD	15
7.2. Presupuesto parcial fabricación	15
7.3. Presupuesto parcial de montaje	15
7.4. Presupuesto parcial de validación	16
8.1. Presupuesto total	17

Capítulo 1

Introducción

El presente presupuesto tiene como objetivo proporcionar toda la información detallada del coste que supone la ejecución del proyecto: “Diseño de Base Giroscópica para el Análisis de Control de Actitud de Cuadricópteros”. En este documento se expone, por tanto, el coste de diseño, fabricación, montaje y validación de la plataforma giroscópica.

Este proyecto se ha dividido en 11 unidades de obra, agrupadas a su vez en 4 grupos funcionales del siguiente modo:

- Grupo 1: Diseño mediante CAD.
 - Diseño de estructura para impresión 3D.
 - Diseño de estructura de aluminio industrial.
 - Diseño de método de alimentación de la estructura.
- Grupo 2: Fabricación.
 - Impresión 3D de la estructura.
 - Validación de la fabricación.
- Grupo 3: Montaje.
 - Montaje de estructura impresa en 3D.
 - Montaje de estructura en aluminio industrial.
 - Cableado de ambas estructuras.
 - Montaje final de estructura completa.
- Grupo 4: Validación.
 - Ejecución de pruebas de esfuerzo sobre la estructura.
 - Ejecución de pruebas de colección de datos y funcionamiento.

Para cada una de las unidades de obra se calcularán todos sus costes, tanto de material y maquinaria como de personal, y se especificará un coste unitario por unidad de obra. Asimismo, al final presupuesto se adjunta un resumen de los costes directos generados por el proyecto, el beneficio industrial y los impuestos.

Capítulo 2

Precio Mano De Obra

En este apartado se pretende hallar el coste generado por la contratación de empleados para la realización del proyecto. La ejecución del mismo requerirá de la mano de obra de un (1) ingeniero técnico aeroespacial, que trabajará a tiempo completo para llevar a cabo todas las unidades de obra. Excepcionalmente, se incorporará un (1) operario más para el caso de la unidad de obra asociada a los tests de validación, por lo que su coste figura exclusivamente en dicha partida.

Además del sueldo en bruto que cobra el personal, es necesario tener en cuenta también el coste de la cotización a la seguridad social que se debe realizar con motivo de su trabajo.

Tabla 2.1: Precio mano de obra parte a)

Código	Tipo de empleado	Salario bruto (€/mes)	Horas diarias de trabajo	Días laborales por mes	Salario (€/hr)
MO. ING	Ingeniero técnico	2.500,00	8	22	14,20
MO. OP	Operario	1.500,00	8	22	8,52

Tabla 2.2: Precio mano de obra parte b)

Código	Tipo de empleado	Salario anual (€)	Seguridad social (€)	Coste anual (€)	Precio (€/hr)
MO. ING	Ingeniero técnico	30.000,00	10.000,00	40.000,00	18,94
MO. OP	Operario	18.000,00	10.000,00	28.000,00	13,26

Capítulo 3

Precios de Materiales

En este apartado se presenta el cuadro de precios de materiales, en el cual se recoge el coste derivado de la compra de materiales, de la amortización de los bienes ya adquiridos y de la adquisición de las licencias informáticas que son necesarias para la realización del proyecto.

Tabla 3.1: Tabla de materiales

Código	Materiales	Precio (€/ud)	ud	Coste total (€)
MAT.0	Aro impresión 3D	250,00	1	250,00
MAT.1	Acople aro-soporte metálico	20,00	2	40,00
MAT.2	Columnas metálicas	3,55	2	7,10
MAT.3	Anillo rozante tipo 1 (Missouri)	26,79	2	53,58
MAT.4	Anillo rozante tipo 2 (Sparkfun)	20,00	2	40,00
MAT.5	Base dron	20,00	1	20,00
MAT.6	Motores brushless	25,00	4	100,00
MAT.7	Placa BB Blue	90,47	1	90,47
MAT.8	Tubo aluminio	2,25	1	2,25
MAT.9	Corona de rodamientos	21,91	1	21,91
MAT.10	Circulo mecanizado	10,00	1	10,00
MAT.11	ESC	19,00	4	76,00
MAT.12	Hélices	0,75	4	3,00
			Total	753,88

Capítulo 4

Precios de Maquinaria

En este apartado se presenta el cuadro de precios de maquinaria, en el cual se indica el coste de toda la maquinaria que sería preciso adquirir, junto con el número de unidades necesarias para la ejecución del presente proyecto.

Tabla 4.1: Precios de maquinaria

Código	Maquinaria	Precio (€/ud)	ud	Coste total (€)
MAQ.0	Ordenador portátil	183,15	1	183,15
MAQ.1	Licencia Solidworks	2543,50	1	2543,50
MAQ.2	Impresora 3D	423,97	1	423,97
MAQ.3	Soldadura	120	1	120
Total				3290,47

Capítulo 5

Precios Unitarios

En este capítulo se proporcionan los cálculos totales de los costes del proyecto en función de cada unidad de obra. Dichos cálculos se encuentran desarrollados en profundidad en apartados posteriores en función de los costes de maquinaria, mano de obra y materiales requeridos en el presente proyecto.

Tabla 5.1: Diseño mediante CAD

Unidades de obra	Coste total (€)
Unidad de obra 1	3.436,20
Unidad de obra 2	148,78
Unidad de obra 3	297,57
Total	3.882,55

Tabla 5.2: Fabricación

Unidades de obra	Coste total
Unidad de obra 1	2.062,84
Unidad de obra 2	56,80
Total	2.119,64

Tabla 5.3: Montaje

Unidades de obra	Coste total
Unidad de obra 1	396,92
Unidad de obra 2	92,30
Unidad de obra 3	154,08
Unidad de obra 4	170,69
Total	813,99

Tabla 5.4: Validación

Unidades de obra	Coste total
Unidad de obra 1	71,00
Unidad de obra 2	71,00
Total	142,00

Capítulo 6

Precios descompuestos

Para estimar el coste que supone cada una de las tareas, es necesario realizar un desglose de las horas empleadas por el personal. En este apartado se desglosan las 11 unidades de obra en subtareas y se calcula el número de horas requeridas para llevar a cabo cada una de ellas.

6.1. Cálculo de horas por tarea

6.1.1. Grupo 1: Diseño mediante CAD

Tabla 6.1: Tiempo dedicado al diseño mediante CAD

Tareas	Días	Horas Dedicadas
Diseño de estructura para impresión 3D	15	60
Diseño de estructura metálica	2	10
Diseño de método de sensorización de la estructura	4	20
Total		90

6.1.2. Grupo 2: Fabricación

Tabla 6.2: Tiempo dedicado a la fabricación

Tareas	Días	Horas Dedicadas
Impresión 3D de la estructura	12	250
Validación de la fabricación	1	4
Total		254

6.1.3. Grupo 3: Montaje

Tabla 6.3: Tiempo dedicado al montaje

Tareas	Días	Horas Dedicadas
Montaje de la estructura impresa en 3D	1	10
Montaje de estructura metálica	1	10
Sensorización de ambas estructuras	1	10
Montaje final de estructura completa	1	10
Total		40

6.1.4. Grupo 4: Validación

Tabla 6.4: Tiempo dedicado a la validación

Tareas	Días	Horas Dedicadas
Ejecución de pruebas de esfuerzo sobre la estructura	1	5
Ejecución de pruebas de colección de datos y funcionamiento	1	5
Total		10

6.2. Precios descompuestos

Una vez hallado el tiempo necesario para desempeñar las tareas de cada unidad de obra y conociendo el conjunto de materiales y equipos a adquirir, se debe realizar el cálculo del coste total para cada una de las unidades de obra.

6.2.1. Grupo 1: Diseño mediante CAD

Tabla 6.5: Diseño de estructura para impresión 3D.

Concepto	Importe (€)
Ingeniero técnico	852,00
Ordenado portátil	2,71
Licencia Solidworks	2.543,50
Total	3.436,20

Tabla 6.6: Diseño de estructura metálica.

Concepto	Importe (€)
Ingeniero técnico	142,00
Ordenado portátil	6,78
Total	148,78

Tabla 6.7: Diseño de método de sensorización de la estructura.

Concepto	Importe (€)
Ingeniero técnico	284,00
Ordenado portátil	13,57
Total	297,57

6.2.2. Grupo 2: Fabricación

Tabla 6.8: Impresión 3D de la estructura

Concepto	Importe (€)
Operario	1.278,00
Ordenado portátil	135,67
Impresora 3D	339,17
Aro impresión 3D	250,00
Acople aro-soporte metálico	40,00
Estructura cuadricóptero	20,00
Total	2.062,84

Tabla 6.9: Validación de la fabricación

Concepto	Importe (€)
Ingeniero técnico	56,80
Total	56,80

6.2.3. Grupo 3: Montaje

Tabla 6.10: Montaje de la estructura impresa en 3D

Concepto	Importe (€)
Operario	85,20
Anillo rozante tipo 2	40,00
Tubo aluminio	2,25
Placa de control BB Blue	90,47
Motores de escobilla	100,00
ESC	76,00
Hélices	3,00
Total	396,92

Tabla 6.11: Montaje de estructura metálica

Concepto	Importe (€)
Operario	85,20
Columnas metálicas	7,10
Total	92,30

Tabla 6.12: Cableado de ambas estructuras

Concepto	Importe (€)
Operario	34,08
Soldadura	120,00
Total	154,08

Tabla 6.13: Montaje final de estructura completa

Concepto	Importe (€)
Operario	85,20
Corona de rodamientos	21,91
Círculo mecanizado	10,00
Anillos rozantes tipo 1	53,58
Total	170,69

6.2.4. Grupo 4: Validación

Tabla 6.14: Ejecución de pruebas de esfuerzo sobre la estructura.

Concepto	Importe (€)
Ingeniero técnico	71,00
Total	71,00

Tabla 6.15: Ejecución de pruebas de colección de datos y funcionamiento.

Concepto	Importe (€)
Ingeniero técnico	71,00
Total	71,00

Capítulo 7

Presupuesto parcial

En el presente apartado se calcula el coste parcial asociado a cada grupo funcional. El mismo se ha obtenido multiplicando y sumando el coste de las unidades de obra que componen cada grupo teniendo en cuenta las veces que deben realizarse en el proyecto.

Tabla 7.1: Presupuesto parcial de diseño mediante CAD

Unidad de obra	Cantidad	Precio (€)	Coste total (€)
Unidad de obra 1	1	3.436,20	3.436,20
Unidad de obra 2	1	148,78	148,78
Unidad de obra 3	1	297,57	297,57
Total			3.882,55

Tabla 7.2: Presupuesto parcial fabricación

Unidad de obra	Cantidad	Precio (€)	Coste total (€)
Unidad de obra 1	1	2.062,84	2.062,84
Unidad de obra 2	1	56,80	56,80
Total			2.119,64

Tabla 7.3: Presupuesto parcial de montaje

Unidad de obra	Cantidad	Precio (€)	Coste total (€)
Unidad de obra 1	1	396,92	396,92
Unidad de obra 2	1	92,30	92,30
Unidad de obra 3	1	154,08	154,08
Unidad de obra 4	1	170,69	170,69
Total			813,99

Tabla 7.4: Presupuesto parcial de validación

Unidad de obra	Cantidad	Precio (€)	Coste total (€)
Unidad de obra 1	1	71,00	71,00
Unidad de obra 2	1	71,00	71,00
Total			142,00

Capítulo 8

Presupuesto de ejecución material, de inversión y de licitación

En esta última sección se calcula el importe total del proyecto añadiendo los costes debidos a la gestión del mismo y a los impuestos.

Tabla 8.1: Presupuesto total

Concepto	Coste (€)
Grupo funcional 1	3.882,55
Grupo funcional 2	2.119,64
Grupo funcional 3	813,99
Grupo funcional 4	142,00
PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN MATERIAL	6.958,19
Gasto generales (15 %)	1.043,73
Beneficio industrial (6 %)	480,11
TOTAL PRESUPUESTO INVERSIÓN	8.482,03
IVA (21 %)	1.781,23
TOTAL	10.263,25

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad en EUROS: SEIS MIL NOVECIENTOS CINCUENTA Y OCHO EUROS CON DIECINUEVE CÉNTIMOS

Asciende el presupuesto de inversión a la expresada cantidad en EUROS:

OCHO MIL CUATROCIENTOS OCHENTA Y DOS EUROS CON TRES CÉNTIMOS

Asciende el presupuesto base de licitación a la expresada cantidad en EUROS:

DIEZ MIL DOSCIENTOS SESENTA Y TRES EUROS CON VEINTICINCO CÉNTIMOS



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Trabajo Final de Grado

Diseño de Base Giroscópica para el Análisis de Control de la Actitud de Cuadricópteros

ANEXOS

Autor:

Alberto Javier Pemán Hernández

Director:

Sergio García-Nieto Rodríguez

Valencia, a 6 de julio de 2017

Índice general

1. Introducción	1
2. Anillo rozante tipo 1	3
3. Anillo rozante tipo 2	5
4. Placa “BeagleBone Blue”	7
5. Motores de escobillas	9
6. ESC	11
7. Hélices	13

Capítulo 1

Introducción

En este documento se recogen las especificaciones técnicas de todos los elementos que se han comprado para realizar el proyecto.

Capítulo 2

Anillo rozante tipo 1

El siguiente enlace lleva a las especificaciones técnicas del producto.

<http://mwands.com/store/180-amp-6-wire-slip-ring?search=slip%20ring>

Capítulo 3

Anillo rozante tipo 2

El siguiente enlace lleva a las especificaciones técnicas del producto.

<https://www.sparkfun.com/products/13065>

Capítulo 4

Placa “BeagleBone Blue”

El siguiente enlace lleva a las especificaciones técnicas del producto.

<https://beagleboard.org/blue>

Capítulo 5

Motores de escobillas

El siguiente enlace lleva a las especificaciones técnicas del producto.

<http://www.getfpv.com/lumenier-rx2206-11-2350kv-motor.html>

Capítulo 6

ESC

El siguiente enlace lleva a las especificaciones técnicas del producto.

<http://www.getfpv.com/lumenier-f390-30a-blheli-esc-opto-2-4s.html>

Capítulo 7

Hélices

El siguiente enlace lleva a las especificaciones técnicas del producto.

<http://www.getfpv.com/lumenier-5x4x3-3-blade-propeller-set-of-4-black.html>