

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería en las Tecnologías
Industriales

Diseño y fabricación mediante tecnologías aditivas
de un UAV para inspección de alcantarillado

DEP. INGENIERÍA MECÁNICA Y FABRICACIÓN
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería en las Tecnologías Industriales

Diseño y fabricación mediante tecnologías aditivas de un UAV para inspección de alcantarillado

Autor:

Adolfo Martínez Franconetti

Tutor:

Andrés Jesús Martínez Donaire

Profesor contratado doctor

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Grado: Diseño y fabricación mediante tecnologías aditivas de un UAV para inspección de alcantarillado

Autor: Adolfo Martínez Franconetti

Tutor: Andrés Jesús Martínez Donaire

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Elena y a mi padre Manuel, por todo lo que me han dado siempre y por haberme dado la oportunidad de estudiar. Por su puesto a mi hermano Nicolás, que a pesar de haberme chinchado desde la cuna sin cuartel alguno, hemos compartido lo que llevamos de vida, y compartiremos lo que nos queda de ella.

Agradecer a la “shavaleria” que han sido mis amigos desde el primer día, por todas esas clases que nos hemos saltado, y por todas esas birras que hemos compartido. Agradecer a los “máquinas”, que a pesar de ser el grupo de trabajo más reventao de la facultad, nunca es tarde para hacer buenos amigos.

Sobre todo a mis profesores, desde los primeros hasta los últimos. En especial a mis profesores Aida y Andrés, a ella por haberme aguantado y a él por sacar de su tiempo para compartirlo conmigo.

Agradecer a Jacinto mis primeros pasos en el mundo profesional, por los logros de los que me hizo partícipe.

Y por último pero no menos importante a Evita, que siempre me saca una sonrisa.

Adolfo Martínez Franconetti

Sevilla, 2016

Resumen

En este proyecto se va a diseñar y a fabricar con tecnologías aditivas un aparato volador para la inspección de alcantarillados. Se pretende así mejorar las inspecciones que se realizan en la red de saneamiento de la ciudad, para prevenir riesgos laborales innecesarios y para sacar el máximo rendimiento económico y social a esta actividad.

Se inicia este documento con el planteamiento de un problema, para tratar a continuación la búsqueda de una solución real que pueda ser implementada de manera rápida, sencilla y eficaz.

Seguidamente se procede a desarrollar el modelo de dron capaz de atajar el problema planteado, donde la estructura del mismo juega un papel clave en la eficacia de la solución.

Finalmente, una vez desarrollada la solución, se lleva el modelo a la realidad en forma de prototipo, mediante el uso de impresoras de tecnología FDM de modelado por deposición fundida de polímeros.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Índice	13
Índice de Figuras	15
1 Introducción	19
1.1 <i>Breve reseña histórica</i>	19
1.1.1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)	19
1.1.2 Additive Manufacturing	21
1.2 <i>Variedad de aplicaciones</i>	22
1.2.1 Aplicaciones de los UAVs	22
1.2.2 Aplicaciones de la fabricación aditiva	24
1.2.3 Aplicaciones combinadas	26
1.3 <i>Objetivo / alcance del Proyecto</i>	26
2 Caracterización y abordaje del problema	29
2.1 <i>Descripción de necesidades</i>	29
2.2 <i>Entorno de trabajo</i>	29
2.2.1 Dimensiones y geometrías de los conductos	30
2.2.2 Presencia de agua y humedades	30
2.2.3 Obstáculos e irregularidades	31
2.2.4 Impactos sólidos o líquidos	31
2.2.5 Visibilidad	32
2.2.6 Atmósfera	32
2.3 <i>Parámetros de diseño</i>	33
2.3.1 Colisiones	33
2.3.2 Resistencia a impactos	33
2.3.3 Acceso de señal	33
2.3.4 Impermeabilidad	33
2.3.5 Flotabilidad	34
2.3.6 Dimensiones y maniobrabilidad	34
2.3.7 Iluminación artificial	34
3 Diseño del aparato	35
3.1 <i>Opciones y desarrollo</i>	35
3.2 <i>Estructura y componentes de un multirotor</i>	36
3.2.1 Marco o cuerpo	36
3.2.2 Motores, helices y ESCs	37
3.2.3 Controlador de vuelo	37
3.2.4 Radio receptor	37
3.2.5 Baterías	38
3.2.6 Módulos de posicionamiento	38

3.2.7	Cámara con estabilizador	38
3.2.8	Sistema FPV (First Person View)	39
3.3	<i>Estructura funcional</i>	39
3.4	<i>Opciones de modelo</i>	40
3.5	<i>Modelo final</i>	54
3.6	<i>Mapa de ensamble de las piezas</i>	64
3.7	<i>Método de acceso de señal</i>	65
4	Fabricación y montaje	67
4.1	<i>Fabricación</i>	67
4.2	<i>Problemas en la fabricación</i>	73
4.3	<i>Montaje</i>	77
5	Conclusión y posibilidades de mejora	87
5.1	<i>Conclusión</i>	87
5.2	<i>Posibilidades de mejora, segunda iteración.</i>	87
5.3	<i>Impacto económico y social</i>	89
	Referencias	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Globos militares austríacos sobre la ciudad de Venecia en el siglo XIX.	19
Figura 1-2. Torpedo aéreo “Kettering Bub” utilizado por el ejército estadounidense en la Primera Guerra Mundial.	20
Figura 1-3. Figura 1-3. Microdrones de uso militar.	21
Figura 1-4. Dron Solara de autonomía de larga duración.	21
Figura 1-5. Charles Hull inventó la estereolitografía (1983).	21
Figura 1-6. Scott Crump inventó la tecnología FDM (1988).	21
Figura 1-7. Primera impresora autorreplicada.	22
Figura 1-8. Dron de salvamento marítimo.	23
Figura 1-9. Dron de control de incendios.	23
Figura 1-10. Dron de fumigación de cultivos.	24
Figura 1-11. Dron de entrega de paquetería.	24
Figura 1-12. Optimización topológica industria aeronáutica.	25
Figura 1-13. Carrocería de vehículo impresa en 3D.	25
Figura 1-14. Prótesis de antebrazo impresa en 3D.	26
Figura 1-15. Oreja biónica de células impresas.	26
Figura 2-1. Geometría de colector de redes.	29
Figura 2-2. Nivel de agua de las conducciones.	29
Figura 2-3. Atoramiento de la conducción.	30
Figura 2-4. Cucarachas en las paredes.	30
Figura 2-5. Condiciones de iluminación.	31
Figura 2-6. Inspección con equipos de respiración.	31
Figura 3-1. Dron aeroplano.	35
Figura 3-2. Dron dirigible (Zeppelin).	35
Figura 3-3. Multirroto 3 hélices.	36
Figura 3-4. Multirroto de 16 hélices.	36
Figura 3-5. Cuerpo de carbono.	37
Figura 3-6. Motor y hélice.	37
Figura 3-7. Controlador del motor.	37
Figura 3-8. Controlador de vuelo de multirroto.	37
Figura 3-9. Radio receptor de señal.	37
Figura 3-10. Batería LiPo.	38

Figura 3-11. Antena GPS.	38
Figura 3-12. Módulo señal GPS.	38
Figura 3-13. Cámara profesional con estabilizador.	39
Figura 3-14. Sistema FPV.	39
Figura 3-15. Esquema de los componentes de un multirroto.	40
Figura 3-16. Hexacóptero de barras.	41
Figura 3-17. Hexacóptero de anillos.	41
Figura 3-18. Hexacóptero de barras distinta longitud.	41
Figura 3-19. Refuerzo en base de viga voladiza.	41
Figura 3-20. Estructura triangulada de viga voladiza con cables de refuerzo.	41
Figura 3-21. Cuadricóptero de aro protector.	42
Figura 3-22. Rotor con jaula protectora.	42
Figura 3-23. Brazo de rotor sencillo.	42
Figura 3-24. Brazo de rotor doble.	43
Figura 3-25. Brazo de rotor triple.	43
Figura 3-26. Caja rectangular en carbono.	44
Figura 3-27. Caja cuadrada en chapa de aluminio.	44
Figura 3-28. Cuerpo de caja hexagonal.	45
Figura 3-29. Cuerpo hexagonal modificado.	45
Figura 3-30. Cuerpo de anillo perforado.	46
Figura 3-31. Mecanismo de paraguas giratorio.	47
Figura 3-32. Dron con protección cilíndrica	47
Figura 3-33. Mecanismo de giroscopio con sus componentes.	48
Figura 3-34. Modelo giroscopio de anillos concéntricos.	48
Figura 3-35. Modelo giroscopio de anillo único.	49
Figura 3-36. Esfera de meridianos.	50
Figura 3-37. Esfera triangulos.	50
Figura 3-38. Icosaedro truncado.	50
Figura 3-39. Parche pentagonal.	50
Figura 3-40. Parche hexagonal.	50
Figura 3-41. Ensamble de icosaedro truncado a parches.	51
Figura 3-42. Ensamble de barras de icosaedro truncado.	52
Figura 3-43. Poliedros de poliestireno.	53
Figura 3-44. Aeroplano de patines flotantes.	53
Figura 3-45. Hexacóptero de apoyos flotantes.	53

Figura 3-46. Toroide para el tren de aterrizaje.	54
Figura 3-47. Cuerpo del multirroto.	55
Figura 3-48. Brazo del multirroto.	55
Figura 3-49. Pivote macho vista superior.	56
Figura 3-50. Pivote macho vista inferior.	56
Figura 3-51. Pivote hembra.	57
Figura 3-52. Tramo central de la viga.	57
Figura 3-53. Tramo exterior de la viga.	58
Figura 3-54. Tramo exterior de la viga (detalle).	58
Figura 3-55. Tramo de anillo simple.	58
Figura 3-56. Tramo de anillo simple (detalle).	58
Figura 3-57. Tramo de anillo interior.	59
Figura 3-58. Tramo de anillo interior (detalle).	59
Figura 3-59. Tramo de anillo exterior.	60
Figura 3-60. Diábolo hembra.	60
Figura 3-61. Corte vertical diábolo hembra.	60
Figura 3-62. Diábolo macho.	61
Figura 3-63. Camisa de rotación.	62
Figura 3-64. Camisa de rotación (detalle).	62
Figura 3-65. Unión simple.	62
Figura 3-66. Unión simple (detalle).	62
Figura 3-67. Unión especial.	63
Figura 3-68. Unión especial (detalle).	63
Figura 3-69. Mapa de ensamblado de piezas.	64
Figura 3-70. Croquis de acceso de señal.	65
Figura 4-1. Impresora BCN3D+ utilizada (modelo Mendel).	67
Figura 4-2. Pantalla programa Cura.	69
Figura 4-3. Detalle parámetros Cura.	69
Figura 4-4. Postura impr. del brazo.	70
Figura 4-5. Postura impr. del cuerpo.	70
Figura 4-6. Postura impr. del tramo central viga.	71
Figura 4-7. Postura impr. del pivote macho.	71
Figura 4-8. Postura impr. del tramo exterior viga.	71
Figura 4-9. Postura impr. del pivote hembra.	71
Figura 4-10. Postura impr. del tramo anillo simple.	71
Figura 4-11. Postura impr. del diábolo hembra.	71

Figura 4-12. Postura impr. del tramo anillo interior.	72
Figura 4-13. Postura impr. del diábolo macho.	72
Figura 4-14. Postura impr. tramo anillo exterior.	72
Figura 4-15. Postura impr. camisa de rotación	72
Figura 4-16. Postura impr. unión simple.	72
Figura 4-17. Postura impr. unión especial.	72
Figura 4-18. Huecos en cara superior.	73
Figura 4-19. Hilos sobrantes en las capas.	73
Figura 4-20. Deformaciones por sobrecalentamiento.	74
Figura 4-21. Deslizamiento de capas.	74
Figura 4-22. Obstrucción de boquilla de extrusión.	75
Figura 4-23. Borriones de plástico.	75
Figura 4-24. Warping.	76
Figura 4-25. Goteo de plástico quemado.	76
Figura 4-26. Corte impr. del brazo.	77
Figura 4-27. Corte impr. del cuerpo.	77
Figura 4-28. Corte impr. de pivote macho.	78
Figura 4-29. Corte de impr. de tramo central viga.	78
Figura 4-30. Corte impr. del tramo exterior viga.	78
Figura 4-31. Corte de impr. del tramo de anillo simple.	78
Figura 4-32. Corte de impr. diábolo hembra.	79
Figura 4-33. Soportes de impr. camisa de rotación.	79
Figura 4-34. Ensamble de brazos y rotores.	80
Figura 4-35. Unión del diábolo al cuerpo.	80
Figura 4-36. Soportes de procesador y batería.	81
Figura 4-37. Conexión de tramos.	81
Figura 4-38. Ensamble giroscopio.	82
Figura 4-39. Diábolos exteriores.	83
Figura 4-40. Ensamble dron y giroscopio.	83
Figura 4-41. Ensamble esfera protectora.	84
Figura 5-1. Sensor optico y de ultrasonido.	88
Figura 5-2. Imágenes obtenidas por lidar.	88
Figura 5-3. Dron con dispositivo lidar implementado.	88
Figura 5-4. Vehículos de inspecciones de televisión.	89

1 INTRODUCCIÓN

*La imaginación es más importante que el conocimiento.
Todo debe simplificarse lo máximo posible, pero no más.
- Albert Einstein -*

La investigación, desarrollo e innovación a lo largo de la historia hasta la actualidad ha evolucionado a saltos, bien sean grandes y sonados, o pequeños pero útiles. Las nuevas tecnologías inevitablemente dejan de ser punteras pasando a un segundo plano, donde realmente alcanzan su plenitud.

En este sentido han evolucionado las dos nuevas tecnologías principales tratadas en este documento, que son el empleo de vehículos aéreos no tripulados (en adelante UAV, proveniente de su traducción al inglés, Unmanned Aerial Vehicle) y la utilización de tecnologías de fabricación aditivas. Ambas se concibieron en el siglo pasado y siguen desarrollándose en la actualidad, extendiéndose así los avances logrados hasta llegar a nuestras casas.

1.1 Breve reseña histórica

Se expone a continuación una breve reseña histórica de cada una de las tecnologías principales que se abordarán en este document, desde sus concepciones hasta la actualidad.

1.1.1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

La concepción de los UAV, como muchas de las tecnologías existentes, nació con finalidades bélicas para después finalmente adaptarse desde la industria militar a la industria civil.

Los primeros vehículos aéreos no tripulados se remontan a mediados del siglo XIX, cuando en agosto de 1849 la república italiana de Venecia fue atacada por los austríacos. Éstos idearon un sistema para bombardear la ciudad consistente en globos aerostáticos cargados con explosivos, esta fue la primera forma de vehículo aéreo no tripulado (*Figura 1-1*). Los austríacos idearon el sistema para posicionar con la ayuda del viento dichos globos sobre la ciudad, para después accionarlos mediante un largo alambre de cobre conectando dichos globos a una batería posicionada en lo alto de un edificio.

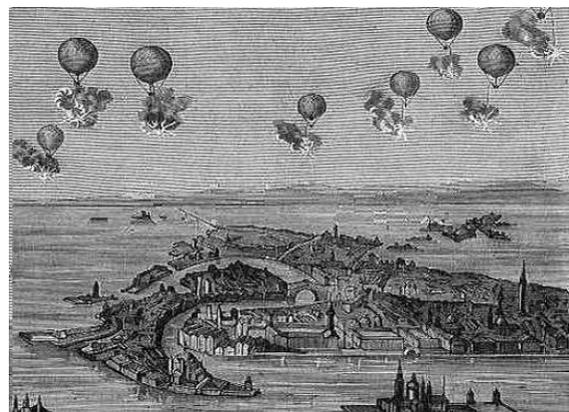


Figura 1-1. Globos militares austríacos sobre la ciudad de Venecia en el siglo XIX.

Durante y después de la primera guerra mundial se desarrollaron el homólogo a los torpedos acuáticos para el aire, aeronaves simples con tecnología de control por radio de baja frecuencia, todo

ello con el fin de luchar contra los zepelines de la época. Aquí es cuando nace el concepto real de avión no tripulado para así desarrollarse por parte del ejército de los Estados Unidos a partir de la primera demostración de vuelo en el 1918 (*Figura 1-2*). Poco después de comenzar a desarrollar el proyecto la guerra terminó sin poder usarse dichos torpedos aéreos en ella.

En el período de entreguerras se siguió desarrollando el concepto de vehículo aéreo no tripulados por dos vertientes, la del torpedo o misil aéreo con forma de aeroplano, y además se consideró su uso como avión hidroplano para finalidades diversas. En este momento es cuando se empezó a apodar dichos UAV como “drones” en alusión al término inglés de las abejas macho o zánganos.



Figura 1-2. Torpedo aéreo “Kettering Bub” utilizado por el ejército estadounidense en la Primera Guerra Mundial.

Hasta casi entrada la segunda guerra mundial, los conceptos de UAV aparecidos no eran capaces de ser controlados más allá de donde la vista alcanza. Casi entrada la guerra entre 1940 y 1941 se empezaron a desarrollar drones con instrumentación que medía a tiempo real diversos parámetros como la altitud, dirección, régimen de motor... consiguiendo además colocar en ellos sistemas como circuitos de televisión para su control local en un rango de unos 30 kilómetros.

Tras el éxito bélico en el campo de aviones no tripulados y después de la segunda guerra mundial, durante la guerra fría, se diversificó el uso de los UAV por parte de los gobiernos pero sólo en el ámbito bélico. Se desarrollaron prototipos para la inspección aérea de zona enemiga, para servir de señuelo en invasiones aéreas, para la toma de muestras radioactivas en los ensayos nucleares en el atolón de Bikini...

A partir de entonces, a finales del siglo XX, se utilizaron drones para servir de señuelos en los conflictos y se investigó en su posible uso como satélites dentro de la atmósfera terrestre.

Ya entrado el siglo XXI se expandió el uso de los microdrones (*Figura 1-3*) para uso personal bien sea con fines militares o civiles y además se desarrollan prototipos capaces de volar de manera permanente dentro de la atmósfera terrestre bien mediante el uso de energía solar (*Figura 1-4*) u otros tipos de energía.



Figura 1-3. Microdrones de uso militar. Figura 1-4. Dron Solara de autonomía de larga duración.

Actualmente, los microdrones de uso recreativo han llegado a todos los hogares e industrias superando con creces la exclusividad hasta la fecha de la industria militar.

1.1.2 Additive Manufacturing

La concepción de la fabricación aditiva se remonta a la década de 1980 del siglo pasado, aunque las tecnologías predecesoras datan de mediados del siglo XX, no fue hasta esta década cuando se crearon las primeras máquinas para la fabricación aditiva.

En un principio estas tecnologías eran conocidas como tecnologías de prototipado rápido (RP Rapid Prototyping), y nacieron en mayo de 1980 de la mano del Dr Kodama en Japón, quién no realizó correctamente el proceso de patente. Por lo que no fue hasta el año 1986 cuando se patentó de manera definitiva la tecnología de estereolitografía (SLA) consistente en la curación de polímeros plásticos en polvo mediante el control por láser de radiación UV.



Figura 1-5. Charles Hull inventó la estereolitografía (1983).

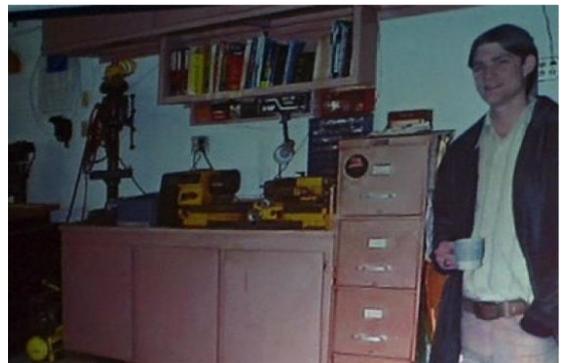


Figura 1-6. Scott Crump inventó la tecnología FDM (1988).

No fue hasta la década de 1990 cuando se desarrollaron nuevas tecnologías de fabricación aditiva como son el modelado por deposición fundida (FDM) patentada por Stratasy Inc. en 1992, cuya empresa sigue en posesión de la patente hoy en día. También al comienzo de esta década se patentaron nuevas tecnologías como son la sinterización láser directa de metal (DMLS), la fabricación de partículas balísticas (BPM), la fabricación de objetos laminados (LOM) o el curado en base sólida (SGC).

A lo largo de la década de 1990 hasta el año 2000, se desarrollaron múltiples tecnologías centradas en aplicaciones industriales específicas, y fue en el comienzo del nuevo siglo cuando se comenzaron

a expandir estas tecnologías en un mercado mundial, donde las empresas especializadas competían en estas nuevas tecnologías conocidas como de fabricación aditiva (AM).

Fue en el nuevo siglo, y en concreto en el año 2007, cuando se diferenciaron claramente dos tendencias en el sector de la fabricación aditiva. Una de las tendencias seguía en la misma línea, que representaba el sector de la fabricación aditiva de alto nivel con máquinas de elevada precisión, complejas y caras. Sin embargo, la nueva tendencia surgió en este mismo año cuando se comenzaron a comercializar máquinas por menos de 10.000 \$, este fue el comienzo de un mercado para todos los públicos en el que las empresas comenzaron a comercializar máquinas de código abierto capaces de autorreplicarse como las RepRap. (Figura 1-7)

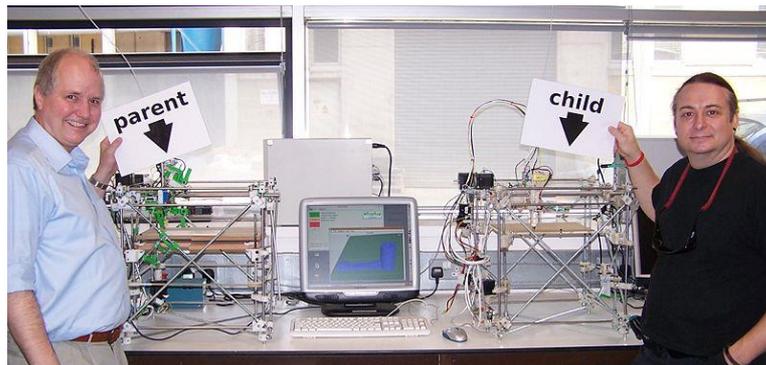


Figura 1-7. Primera impresora autorreplicada.

Como resultado de la divergencia de mercado, los avances significativos a nivel industrial de capacidades y aplicaciones y el acusado aumento de conciencia, 2013 fue un año de crecimiento y consolidación significativa del impacto que la impresión 3D está teniendo en el sector industrial y el enorme potencial que está demostrando para el futuro de los consumidores.

1.2 Variedad de aplicaciones

Las nuevas tecnologías hoy en día están al alcance de un amplio público, cosa que hace años era impensable. Quizá ese sea el principal motivo por el cual las aplicaciones de tecnologías recientes o concebidas con anterioridad se multiplican estos años de manera acusada, en la mayoría de los casos en favor de la sociedad. Un claro ejemplo son las dos principales tecnologías tratadas en este documento, que actualmente están al alcance de cualquier persona, como son la fabricación aditiva y el uso de los UAV. De ambas tecnologías

1.2.1 Aplicaciones de los UAVs

- Búsqueda de personas. Uno o más drones de tipo helicópteros pueden buscar personas desaparecidas en lugares abiertos o de difícil acceso como zonas montañosas o nevadas. El reducido tamaño de estos UAV, permite tenerlos siempre disponibles en estaciones de montaña, o para salvamento marítimo en las playas (Figura 1-8), reduciendo considerablemente el tiempo de búsqueda. El bajo coste de estos drones comparados con el coste de un helicóptero tradicional los hacen idóneos para esta tarea (un helicóptero tradicional es al menos de 30 a 60 veces más caro, y supone riesgo de vidas humanas, alto

consumo de combustible, etc).

- Prevención y control de incendios. En el campo forestal, los drones o UAVs permiten la constante supervisión, en horas de alto riesgo, de un área boscosa, en busca de puntos activos o conatos de incendio (*Figura 1-9*). El vehículo no tripulado puede supervisar una amplia zona boscosa desde el aire, sin riesgo de vidas humanas y reduciendo los costes comparado con los activos humanos necesarios para desarrollar la misma tarea. Además, pueden trabajar de forma individual o colectiva (mediante técnicas de swarm intelligence) en la coordinación de retenes en caso de incendios, en la detección de focos activos y en el estudio aéreo de la evolución del fuego.



Figura 1-8. Dron de salvamento marítimo.



Figura 1-9. Dron de control de incendios.

- Aplicaciones militares (reconocimiento). Contar con un vehículo aéreo no tripulado puede ser útil en misiones de reconocimiento, para planear tácticas, observar instalaciones desde el aire o realizar tareas de escolta a un convoy militar. Son en particular especialmente interesantes las tareas de vigilancia de fronteras y zonas de acceso restringido, con la posibilidad de establecer una patrulla constante en la zona a proteger y realizar una detección automática de las situaciones de riesgo, disparando una alarma de supervisión manual.
- Control y análisis de multitudes. Para el control de aglomeraciones durante manifestaciones o conciertos, para velar de una manera estratégica por la seguridad del ciudadano en grandes concentraciones de personas.
- Agricultura. Control y monitorización del estado de los cultivos mediante imágenes multispectrales, control de la eficiencia de regadíos. Conteo y supervisión de producción agrícola subvencionada (por ejemplo, número de árboles). (*Figura 1-10*)
- Ayuda humanitaria. En zonas de guerra o bien en zonas de catástrofes naturales con difícil acceso, los grandes UAVs con capacidades de carga elevada pueden hacer llegar a las personas material de primera necesidad (alimentos, medicinas...)



Figura 1-10. Dron de fumigación de cultivos.



Figura 1-11 Dron de entrega de paquetería.

- Mensajería. A día de hoy ya se emplean estos aparatos en transporte de paquetes de mensajería (Figura 1-11), tanto para repartos puntuales como la apuesta por las grandes compañías por establecer redes de distribución de paquetes mediante el uso de los mismos.

1.2.2 Aplicaciones de la fabricación aditiva

- Industria aeroespacial.

Las diferentes aplicaciones actuales en el sector aeroespacial abarcan tanto fabricación de objetos sencillos, tales como reposabrazos, a piezas complejas como diferentes componentes del motor. Aplicaciones tales como impresión de las alas y partes de aviones en condiciones de microgravedad son previsibles en un futuro próximo.

Ventajas tales como reducir el tiempo de comercialización construyendo rápidamente prototipos con el ajuste, la forma y funcionalidad requeridas, reduciendo tiempos de mercado. Produciendo herramientas de diseño complejas o accesorios que son difíciles o imposibles de producir con técnicas de mecanizado tradicionales. Creando utillaje de bajo coste, diseñando y probando rápidamente nuevos productos. Las piezas pueden ser diseñadas sin mirar cómo se acomodan a las capacidades de fabricación, sino que se diseñan para ofrecer la máxima eficiencia. Optimización topológica (Figura 1-12) y simplificación de piezas para reducir notablemente los pesos y conseguir conexiones más sencillas entre piezas. Electrónica embebida (incrustada) en la propia fabricación de la pieza, ofreciendo una gran oportunidad de innovación en los productos.



Figura 1-12. Optimización topológica industria aeronáutica.

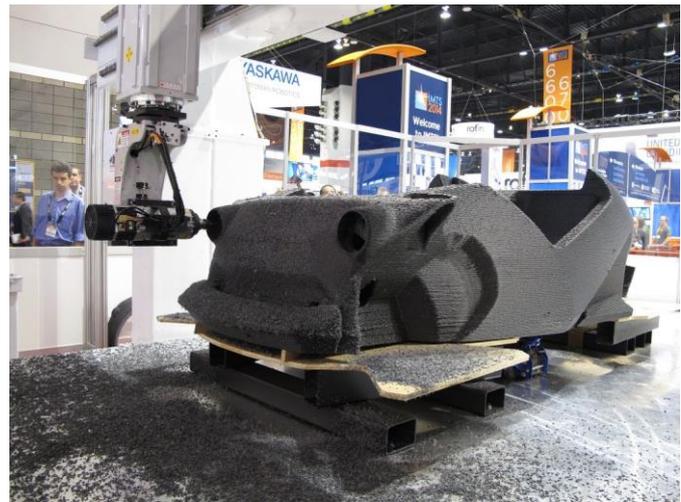


Figura 1-13. Carrocería de vehículo impresa en 3D.

- Industria automotriz.

Para la industria del automóvil, la impresión 3D ha abierto las puertas de la creación de nuevos diseños, logrando productos más seguros, más limpios y más ligeros, con plazos de entrega más cortos y menores costos. Existen dos formas principales en las que la fabricación aditiva puede ser un aspecto crucial en la competencia entre los fabricantes de automóviles y potencialmente ser un elemento distintivo:

- Innovación de productos: Se puede producir componentes con menos restricciones de diseño que a menudo limitan los procesos más tradicionales de fabricación. Esta flexibilidad es extremadamente útil permitiendo productos con características personalizadas, por lo que es posible añadir nuevas funcionalidades y conseguir geometrías complejas. (Figura 1-13)
- Transformación de la cadena de suministro: Se elimina la necesidad de nuevo utillaje (tooling) y se consigue la capacidad de producir directamente piezas finales, reduciendo el tiempo total de producción. Se mejora así la capacidad de respuesta de mercado y además, puesto que generalmente la impresión 3D utiliza sólo el material que es necesario, puede reducir drásticamente los residuos y reducir el uso de la materia prima. También la posibilidad de utilizar para la impresión componentes más ligeros, pueden reducir los costos de manejo, mientras que la producción bajo demanda y geográficamente cerca de ésta, puede reducir los costos de inventario, apoyando así la producción descentralizada.

- Industria médica.

La impresión 3D se ha utilizado históricamente en el sector de dispositivos médicos para mejorar el rendimiento en el modelado de productos y prototipos. Uno de los ejemplos es la forma en que se crean audífonos personalizados. Tradicionalmente, el proceso de producción de un audífono de estas características era largo y costoso, produciéndose ahora productos más cómodos y fiables, que además son producidos de manera más eficiente. Otro ejemplo es la producción de coronas dentales personalizadas que, a diferencia de los métodos tradicionales de moldeo a mano, los técnicos dentales modernos pueden ahora utilizar los datos que se han escaneados y un software dental específico para diseñar un modelo CAD de la corona de un paciente. Un beneficio clave para la velocidad de producción pasando desde alrededor de 20 cofias dentales por día hasta unas 450 coronas y puentes. Constantemente

salen en los medios de comunicación de noticias que remarcan las bondades de la impresión 3D en aplicaciones reales con pacientes.



Figura 1-14. Prótesis de antebrazo impresa en 3D. Figura 1-15. Oreja biónica de células impresas.

1.2.3 Aplicaciones combinadas

A día de hoy ya existen múltiples aplicaciones donde ambas tecnologías, el uso de UAVs y la fabricación aditiva, van de la mano. Es frecuente utilizar métodos de fabricación que dotan a estos aparatos voladores de características especiales, difíciles de conseguir con la fabricación tradicional.

Cada dron que se crea hoy en día tiene una finalidad específica, y salvo en contadas ocasiones que estos aparatos se diseñan de manera multifuncional, estas personalizaciones de los componentes y geometrías de los aparatos tienen una elevada inversión en costes y tiempo en la fabricación de baja producción, a veces de una manera casi artesanal.

Ello conlleva que la forma más habitual de creación de nuevos aparatos para infinidad de aplicaciones sea mediante fabricación aditiva y más concretamente en impresoras 3D. Donde desde cualquier lugar se pueden diseñar aeronaves o multirrotores, abaratando en gran medida los costes de producción y/o transporte de los materiales. Ya se están usando para aplicaciones militares la creación de UAVs de bajo coste, unidades que los mismos soldados de campo usan para el reconocimiento. Además del uso militar, también se consideran prototipos de bajo coste para aplicaciones civiles a mayor o menor escala. Todo ello debido a que la buena calidad de las piezas impresas y las reducciones de pesos de las mismas aplicando optimización topológica.

1.3 Objetivo / alcance del Proyecto

El objetivo del proyecto está centrado en el uso de nuevas tecnologías de fabricación para el desarrollo de un prototipo capaz de abordar un problema específico en las redes de alcantarillado de la ciudad. Mediante el uso de tecnologías de fabricación aditiva de modelado por deposición fundida o FDM (Fused Deposition Modeling), y la aplicación práctica de vehículos aéreos no tripulados, conocidos como drones o UAV.

La novedad que aporta el proyecto es la adaptación de los UAV (hasta ahora desarrollados para vuelo en espacios aéreos abiertos) para tareas de inspección en espacios reducidos como son las redes de alcantarillado de la ciudad.

El objeto de la inspección en el alcance de este proyecto es meramente visual, dejando abierta una

posible continuación del mismo para mejoras en el prototipo.

2 CARACTERIZACIÓN Y ABORDAJE DEL PROBLEMA

2.1 Descripción de necesidades

La primera fase de todo proyecto consiste en caracterizar el problema que se va a abordar, es importante definir bien el alcance y objetivos del mismo para focalizar la búsqueda de soluciones dentro de un marco de trabajo.

Para este proyecto en cuestión, se va a definir el marco de necesidades en dos grandes grupos que son: el entorno de trabajo y los procedimientos de inspección. Dentro del grupo de procedimientos se va a hacer alusión al procedimiento implementado hasta la fecha y se va a definir la mejora propuesta para la constitución de un nuevo procedimiento más seguro y mucho más eficiente que el anterior.

El entorno de trabajo es el que va a definir las necesidades que el proyecto debe cubrir; mientras que los procedimientos de inspección (bien sean los establecidos hasta la fecha o la modificación que los mismos puedan sufrir a raíz de este proyecto) van a definir el alcance del mismo. En otras palabras, tenemos unas necesidades que cumplir pero debemos emplear los medios necesarios, no más, para que pueda ser rentable económicamente y eficiente en los recursos empleados. De nada sirve desarrollar un prototipo extremadamente complejo y de elevado coste si el procedimiento de inspección tradicional es más simple; de igual manera que de nada sirve desarrollar algo tan simple que no cumpla con las necesidades planteadas.

Encontrar un equilibrio entre ambas partes es vital para que este proyecto pueda ejecutarse en la realidad y reportar beneficios tanto económicos como sociales.

2.2 Entorno de trabajo

La zona de trabajo para nuestro dron en cuestión, son los conductos de alcantarillado para el saneamiento de las aguas de la ciudad de Sevilla y alrededores. Primeramente, el diseño del mismo estará enfocado a operar en lugares de espacio reducido, debajo de la superficie.

Puede suponer una ventaja que la legislación, muy a tener en cuenta en los desarrollos de proyectos con fines profesionales, no contempla el uso de UAV en espacios cerrados, solo legisla el uso de los mismos en espacios abiertos delimitando ciertas libertades. Por lo que respecta a este proyecto, las restricciones de vuelo serán competencia de la propia empresa al cargo de las inspecciones en los conductos de alcantarillado.

Aclarado este asunto, se ejecutará el prototipo del dron sin contemplar aspectos de ámbito legal, para que en una ejecución práctica se pueda adaptar a los requerimientos legales impuestos por la empresa.

Dividiremos la caracterización de la zona de trabajo establecida en varios aspectos a tener en cuenta en el estudio del diseño del prototipo, estos aspectos son: dimensiones y geometrías de conductos, presencia de agua y humedades, irregularidades y obstáculos de la zona de operación.

2.2.1 Dimensiones y geometrías de los conductos

La red de saneamiento en la ciudad de Sevilla y poblaciones de la periferia consta de 2900 Km de red, está compuesta en su mayor parte de conductos y conexiones que oscilan desde los conductos más estrechos de apenas medio metro de diámetro hasta las zonas de afluencia de aguas con secciones de conducto del orden de varios metros (2 o 3 m).

La geometría de dichos conductos varía según el tamaño, pero la mayor parte de ellos responde a una geometría común de ovoide para los conductos de saneamiento. También es posible encontrar tramos más pequeños con geometrías circulares o rectangulares conectados a los ovoides de conducciones principales, o tramos de suelo recto con bóveda para los colectores de las conducciones ovoideas.

Cabe destacar que todas las conducciones o la gran mayoría de ellas están construidas en hormigón lo que podrá suponer un problema tanto de desprendimiento como de recepción de señal.



Figura 2-1. Geometría de colector de redes.



Figura 2-2. Nivel de agua de las conducciones.

2.2.2 Presencia de agua y humedades

Al ser la zona de trabajo conducciones de aguas residuales se debe tener en cuenta la presencia de agua, tanto las corrientes en la parte inferior de los conductos como las posibles agitaciones de agua en las conexiones de los mismos.

Habitualmente las conducciones llevan grandes caudales, lo que se traduce en un alto nivel del agua de manera permanente. Este nivel elevado de agua suele ser de aproximadamente el 40% de la altura total del conducto en condiciones normales.

Para la realización de la inspección se realizan cortes o reducciones de caudal, también se consideran picos horarios de bajo caudal, con idea de que se reduzca al máximo posible el nivel de agua dentro de la conducción. Esto nos permitirá operar el prototipo con un nivel de agua mínimo dentro de los conductos, lo que facilitará la operación, pero seguirá existiendo un lecho de agua y lodos en la zona de trabajo.

Además del lecho de agua en la operación, se deben tener en cuenta la humedad de las paredes o las conexiones auxiliares a la conducción denominadas injerencias o en otros casos invasiones (la conexión del tubo invade la conducción principal obstaculizando el paso), que pueden verter agua desde diferentes alturas. Esto se transformará en una zona de trabajo con un bajo nivel de agua, pero con posibles vertidos laterales de las conexiones en las paredes.

2.2.3 Obstáculos e irregularidades

La presencia de obstáculos dentro de las conducciones van a dificultar el avance del dron a través de los mismos, por lo que se debe estar preparado para un estado no idílico de la zona de trabajo.

Dichos obstáculos pueden aparecer de diversas formas, como puede ser las zonas de cambio de geometría de los conductos o simples conexiones irregulares que pueden provocar la aparición de bordes y resaltos. Zonas susceptibles de resaltos son las zonas de conexión o colectores, e incluso las conexiones laterales de conductos auxiliares a las conducciones principales (invasiones).

Además de los obstáculos propios de la construcción de la red, también podemos encontrar obstáculos menos habituales como pueden ser vigas transversales en los conductos, o simplemente zonas de acumulación de residuos que supongan un taponamiento de la conducción conocidos como atoramientos. (*Figura 2-3*)

En general, se presentarán obstáculos al paso que hay que salvar bien con el manejo del aparato o también facilitar la labor con la propia geometría del dron.



Figura 2-3. Atoramiento de la conducción.



Figura 2-4. Cucarachas en las paredes.

2.2.4 Impactos sólidos o líquidos

Otro de los principales inconvenientes que se presentan son los posibles desprendimientos. Estos desprendimientos sólidos o bien vertidos líquidos sobre el aparato podrían suponer la inutilización del mismo. Es importante considerar que tipos de impactos puede recibir el dron de manera más probable.

Los impactos sólidos que puede recibir el aparato pueden ser debidos a desprendimientos del material de las conducciones, en nuestro caso posibles pequeños desprendimientos de hormigón que puedan impactar de manera vertical sobre el mismo. Además de impactos sólidos de materiales desprendidos de las zonas superiores, hay que considerar los insectos que habitan en la zona como son las cucarachas (*Figura 2-4*). Las cucarachas en esta zona son muy abundantes y se pueden encontrar en cualquier zona de las paredes, contando también en la parte superior de los conductos, que con el paso del aparato o las posibles corrientes de aire por este generadas provoquen el desprendimiento de estos insectos de las paredes.

El otro escenario de impacto posible es el impacto de líquidos, el posible vertido del mismo desde altura sobre el aparato que podría inutilizarlo. Muchas de las conexiones auxiliares están a media y

elevada altura, eso va a provocar pequeñas cataratas que sería conveniente evitar. También el goteo continuado de humedades desde las zonas superiores.

2.2.5 Visibilidad

La estancia bajo tierra de la zona de trabajo hace de esta una zona sumida en total oscuridad (*Figura 2-5*), salvando iluminaciones puntuales por los puntos de acceso bien sea naturalmente o iluminación artificial. Ésta es otra de las peculiaridades del entrono que en la mayoría de los casos se vuelve una desventaja, menos el caso de empleo de tecnologías infrarrojas, sensores que se podrían ver afectados en sus mediciones por la radiación solar.

La necesidad de iluminación para la orientación visual de posibles aparatos en el interior es claramente una desventaja, poniendo de manifiesto que la orientación no visual mediante sensores de posición y proximidad no sufre ninguna alteración en estos entornos. Siendo punto clave la combiación de sistemas visuales y no visuales para procesamiento de la información referente a la posición y orientación dentro de las conducciones.



Figura 2-5. Condiciones de iluminación. Figura 2-6. Inspección con equipos de respiración.

2.2.6 Atmósfera

La atmósfera de la zona de trabajo es otro de sus factores característicos puesto que los gases presentes en las redes provienen de la descomposición de la materia orgánica y provenientes de los tratamientos de las aguas. Todo ello convierte la atmósfera de trabajo en una atmósfera potencialmente explosiva, con abundancia en concentración de contaminantes y deficitara en concentración de oxígeno.

Esto se convierte en una atmósfera peligrosa para los humanos (*Figura 2-6*) debido a contaminantes y calidad del aire, pero también peligrosa para el uso de aparatos en su interior debido a su explosividad. Es un factor que caracteriza la zona de trabajo para consideraciones en los procedimientos de inspección.

2.3 Parámetros de diseño

2.3.1 Colisiones

Primeramente, hay que tener en cuenta que durante los vuelos en espacios confinados (espacios reducidos) la probabilidad de colisionar con las paredes es bastante alta. Esto quiere decir que es una premisa fundamental para el diseño crear un dron capaz de tolerar las colisiones, y además hacer que ello afecte lo menos posible a la estabilidad en vuelo del aparato.

Es simple de ver que además de la necesidad de evitar las colisiones y es fundamental paliar sus efectos negativos cuando se produzcan, puesto que la zona de trabajo es un ambiente hostil donde hay múltiples factores que harían fallar al aparato.

2.3.2 Resistencia a impactos

Además de las posibles colisiones que se puedan producir con la propia inercia del aparato, separamos del problema anterior el caso de los impactos. Un escenario más que probable es el caso de que impacten posibles desprendimientos o insectos sobre el dron, lo que desestabilizará en gran medida el vuelo.

Como los impactos son más difíciles de evitar que las colisiones, en este caso el parámetro de diseño será tratar de paliar sus consecuencias buscando la robustez del aparato, dando por hecho la imposibilidad de evitarlos.

2.3.3 Acceso de señal

Otro de los grandes retos de este proyecto es el acceso de la señal al aparato, el cual debe comunicarse en mayor o menor medida con la base de control de las operaciones del mismo.

La solución habitual de señal para este tipo de aparatos es jugar con el tipo de señal, la frecuencia y la potencia de la misma para conseguir cubrir un determinado área o zona de control para el vuelo del aparato. Éste es el caso de los drones habituales, para vuelos en espacios abiertos, pero en nuestro caso de vuelo en espacios cerrados y soterrados, las reglas del juego cambian.

Las paredes de hormigón harán difícil la repetición de la señal por los conductos, por lo que es un factor a tener en cuenta. Todos los factores adversos para el acceso de señal conducirán a un sobredimensionamiento del alcance mediante factores de seguridad, con fin de evitar la pérdida de la misma.

2.3.4 Impermeabilidad

Un factor clave para asegurar el funcionamiento del mismo es conseguir cierto grado de resistencia al agua, un cierto grado de impermeabilidad.

No es uno de los factores fundamentales del diseño mecánico, pero en cierto modo fundamental para el vuelo en lugares húmedos y reducidos, donde con casi toda probabilidad el aparato estará sometido a salpicaduras y fuertes humedades del ambiente que afectarán a algunos componentes del mismo.

Las salpicaduras deben ser consideradas en múltiples direcciones y con diferentes grados de

severidad. En la dirección vertical, la más probable es la proveniente de goteos por humedad y vertidos de conductos auxiliares a diferentes alturas. En el plano horizontal o planos oblicuos, se considerarán salpicaduras debidas a la agitación de las aguas por parte de los motores y debidas a la propia humedad del ambiente.

2.3.5 Flotabilidad

Parte fundamental de la estructura deberá ser la que permita a la misma flotar sobre el agua, puesto que la zona de trabajo estará inundada hasta cierto nivel de agua.

Es necesario diseñar correctamente los centros de flotación y de gravedad del aparato para su correcto comportamiento sobre una superficie líquida, permitiendo siempre al mismo despegar o aterrizar en dicha superficie.

2.3.6 Dimensiones y maniobrabilidad

Escalar de manera correcta el apartado y diseñar en un marco de dimensiones inicialmente fijadas es básico para el comienzo del proyecto, dar un orden de magnitud para las dimensiones, el cual se afinará con el avance del proyecto.

Podemos establecer un orden de magnitud basándonos en drones comerciales y en el espacio de trabajo, el cual para este proyecto será de medio metro. Estableciendo esta medida se puede estimar ordenes de magnitud para el peso, la potencia, las baterías y muchos más parámetros afines a un UAV, así atendiendo a estudios y soluciones comerciales comprobadas podremos caracterizar el aparato.

2.3.7 Iluminación artificial

Un parámetro fundamental en el diseño es la iluminación. Es necesario para poder operar dentro de las conducciones una iluminación suficiente que permita la visibilidad del operario que controla el aparato. Puesto que la iluminación artificial por lo general consume bastante energía, es necesario, para no sobrecargar de peso al aparato con baterías adicionales, la consideración como parámetro de diseño una iluminación de bajo consumo.

Existiendo en el mercado infinidad de posibilidades de iluminaciones potentes de bajo consumo como la iluminación por LED, solo es cuestión de tomar una elección acertada al implementar un sistema de iluminación en el aparato.

3 DISEÑO DEL APARATO

3.1 Opciones y desarrollo

Una vez queda definido el objetivo, el entorno de trabajo y las necesidades de diseño, comienza el trabajo creativo donde se deben valorar diversas opciones. La búsqueda del modelo definitivo se va a caracterizar por dos pilares fundamentales que son la eficacia y el rendimiento. El objeto del proyecto es crear un UAV capaz de solventar de manera eficaz el problema de las inspecciones de alcantarillado y que, además sea una herramienta de trabajo que aporte mucho con un bajo coste económico y social.

Partiendo de estas premisas la primera opción es valorar y razonar que medio es el más idóneo para abordar el alcantarillado, si el terrestre, acuático, aéreo o una mezcla de ellos.

Conociendo que las alcantarillas siempre están inundadas con un mayor o menor nivel de agua, la opción terrestre se limita a poder avanzar adherido a las paredes de las conducciones, cosa que dejaremos en manos de sólo algunos seres vivos capaces de reptar por las mismas.

En el medio acuático la opción más viable es algún tipo de barco o submarino, cosa que podría resultar para las inspecciones si no fuese por la cantidad de obstrucciones sólidas que podemos encontrar en el agua, producto de los desechos de la ciudad. La opción del barco sería más viable que la de reptar por las paredes de hormigón, pero aun así la dejaremos aparcada en busca de algo mejor.

La opción aérea parece la más idónea, pero presenta algunos inconvenientes como el espacio aéreo reducido dentro de los conductos. Aun así, es la vía más adecuada a pesar de los posibles obstáculos que podamos encontrar en el camino, puesto que permite una fácil evasión de los mismos.

Una vez establecido el medio aéreo como el idóneo, el siguiente paso consiste en valorar los aparatos disponibles para navegar el espacio aéreo que en nuestro caso es bastante reducido.

En primera instancia se descartan los aeroplanos (*Figura 3-1*), puesto que la sustentación necesaria se obtiene por diferencia de presiones en sus cuerpos fuselados, lo que se traduce en altas velocidades y escasa maniobrabilidad.



Figura 3-1. Dron aeroplano.



Figura 3-2. Dron dirigible (Zeppelin).

También debemos descartar los dirigibles (*Figura 3-2*), puesto que la sustentación obtenida de la diferencia de densidades entre gases internos y externos condiciona el tamaño del aparato, limitando sus capacidades de maniobra en espacios tan reducidos.

De los vehículos aéreos de rotores existentes podemos diferenciar entre helicópteros y multirrotores. Ambos se sustentan gracias a las hélices, siendo en el caso del helicóptero un aparato sustentado por una gran hélice principal, el cual para compensar el par rotor provocado por la hélice se le dota de otra hélice secundaria para eliminar el giro descontrolado del aparato. En el caso de los multirrotores la sustentación se reparte en más hélices equidistantes del centro horizontalmente, el cual trabajando sobre las velocidades de giro de los rotores es capaz de direccionar el aparato.

Dentro de las tipologías de vehículos aéreos escogida es la del multirrotor, puesto que ofrece gran versatilidad en las maniobras y además de ello una estabilidad superior frente a los helicópteros gracias a su sustentación repartida.



Figura 3-3. Multirrotor 3 hélices.



Figura 3-4. Multirrotor de 16 hélices.

Dentro del grupo de multirrotores se pueden diferenciar diferentes tipologías en función del número de rotores del que se dote al aparato, existiendo desde trirrotores (*Figura 3-3*) hasta cualquier cantidad de rotores que se precisen (*Figura 3-4*). Es claro que cuantos rotores, más potencia de propulsión y más estabilidad se obtendrá en el aparato, consiguiendo por tanto una mayor capacidad de carga.

3.2 Estructura y componentes de un multirrotor

3.2.1 Marco o cuerpo

Es el esqueleto del multirrotor, es la estructura que le da la forma y en donde todas las otras partes se instalan y aseguran. Existen diferentes diseños y materiales en función de las necesidades del aparato (*Figura 3-5*).

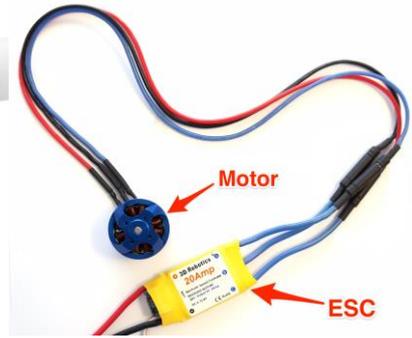


Figura 3-5. Cuerpo de carbono. Figura 3-6. Motor y hélice. Figura 3-7. Controlador del motor.

3.2.2 Motores, helices y ESCs

Son los componentes fundamentales para mantener al multirrotor en el aire. Los ESC (Electronic Speed Control) o Controladores de Velocidad Electrónicos (Figura 3-7) regulan la potencia eléctrica para lograr controlar el giro de los motores con agilidad y eficiencia. Este giro está conectado a las hélices (Figura 3-6) cuya rotación a alta velocidad genera la sustentación del multirrotor.

3.2.3 Controlador de vuelo

Este componente es el cerebro de la máquina. Éste sensa y controla todo lo que sucede con el multirrotor, de ahí la estabilidad de los multirrotos, es a donde prácticamente todos los componentes van conectados. (Figura 3-8)



Figura 3-8. Controlador de vuelo de multirrotor. Figura 3-9. Radio receptor de señal.

3.2.4 Radio receptor

Es el responsable de recibir la señal de radio enviada desde el Control Remoto, el cual ha interpretado el movimiento realizado por el usuario y lo ha transformado en onda radial. La señal de radio es recibida por el Radio Receptor del multirrotor (Figura 3-9) y transformada en datos que se envían al Controlador de Vuelo para que ejecute la instrucción, normalmente con cambios coordinados en la velocidad de los motores (cuando se trate de una instrucción de movimiento).

3.2.5 Baterías

Proporcionan la energía necesaria para hacer funcionar el equipo. Son componentes muy pesados por lo que es esencial que sean capaces de tener una buena relación peso/capacidad para maximizar la autonomía de vuelo del multirrotor. Las más utilizadas son las baterías Li-Po (polímero de litio) (Figura 3-10) debido a su densidad de energía, su bajo peso y su alta tasa de descarga que es ideal para maniobras ágiles como las de un multirrotor.



Figura 3-10. Batería LiPo.



Figura 3-11. Antena GPS.

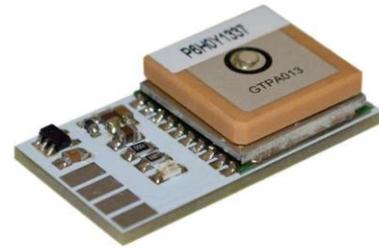


Figura 3-12. Módulo señal GPS.

3.2.6 Módulos de posicionamiento

Componentes que conectados al Controlador de Vuelo le permiten a éste conocer la ubicación, altitud y velocidad exactas del multirrotor. Los más habituales son los sistemas de posicionamiento GPS (Figuras 3-11 y 3-12). A partir de esto, y dependiendo del programa que tenga el controlador, se podría automatizar el comportamiento del multirrotor para mantenerse estático en un mismo punto, volar en cierta dirección o velocidad relativa o volar hacia puntos predefinidos.

3.2.7 Cámara con estabilizador

En la estructura del multirrotor se puede acoplar una cámara para aprovechar el vuelo y capturar fotos o videos desde el aire. Dependiendo del tamaño del multirrotor la cámara podrá ser desde una pesada profesional hasta una liviana cámara de acción, como una GoPro Hero o Sony Action Cam. Normalmente se utiliza un estabilizador o Gimbal para evitar que los movimientos propios del vuelo del multirrotor afecten las tomas (Figura 3-13). Estos gimbal absorben la vibración de los motores y corrigen automáticamente la inclinación de la cámara para que siempre esté en el mismo ángulo respecto al suelo. Algunos gimbal también pueden ser conectados al Controlador de Vuelo y a través del control remoto el usuario puede cambiar el ángulo de inclinación de la cámara mientras el multirrotor está en el aire.



Figura 3-13. Cámara profesional con estabilizador.



Figura 3-14. Sistema FPV.

3.2.8 Sistema FPV (First Person View)

Consiste en un sistema de transmisión y recepción del video capturado por la cámara, en tiempo real. De esta manera el usuario u otro interesado puede ver lo que el multirrotor está “viendo”. Comúnmente consiste en conectar la cámara a un transmisor de video pequeño montado en el drone y un receptor con una pequeña pantalla para que el usuario la pueda cargar y ver mientras acciona el control remoto (Figura 3-14). Es de muchísima utilidad para lograr vuelos de gran altura o distancia de forma segura, y para capturar las mejores tomas durante un vuelo.

3.3 Estructura funcional

Se va a trazar a grandes rasgos el esquema funcional del aparato con la integración de los componentes. (Figura 3-15)

Comenzando por lo importante, que son los motores, dotados de hélices con múltiples opciones de geometría para variaciones de la sustentación. Los cuales, cada uno de ellos está conectado a un ESC (Electronic Speed Control) que son módulos que regulan la potencia eléctrica entregada a cada motor en cada momento para controlar el giro de los mismos con agilidad y eficiencia. Conectados a estos intermediarios que dosifican la potencia a los motores, encontramos el centro de operaciones del mismo que es la placa de procesamiento, que actúa como cerebro de la máquina, capaz de recibir y procesar la información para actuar o dar órdenes. A esta placa de procesamiento van conectados módulos como el módulo de comunicación del aparato con la entidad de control (control remoto), módulos de posicionamiento (GPS) que proporcionan la ubicación geográfica, altitud y velocidad del aparato, los sensores dinámicos como son el acelerómetro y el giroscopio imprescindibles para la estabilización del aparato que suelen ir integrados en el controlador de vuelo. Además de placa con sus módulos considerada el cerebro de procesamiento, encontramos las baterías, que proporcionan energía eléctrica tanto al procesamiento de la información como a los motores que sustentan el aparato. Adicionalmente encontramos sistemas ópticos compuestos por cámaras de video con estabilizadores y sistemas FPV (First Person View) de transmisión y recepción de video a tiempo real y así poder controlar el aparato como si en el fuéramos montados.

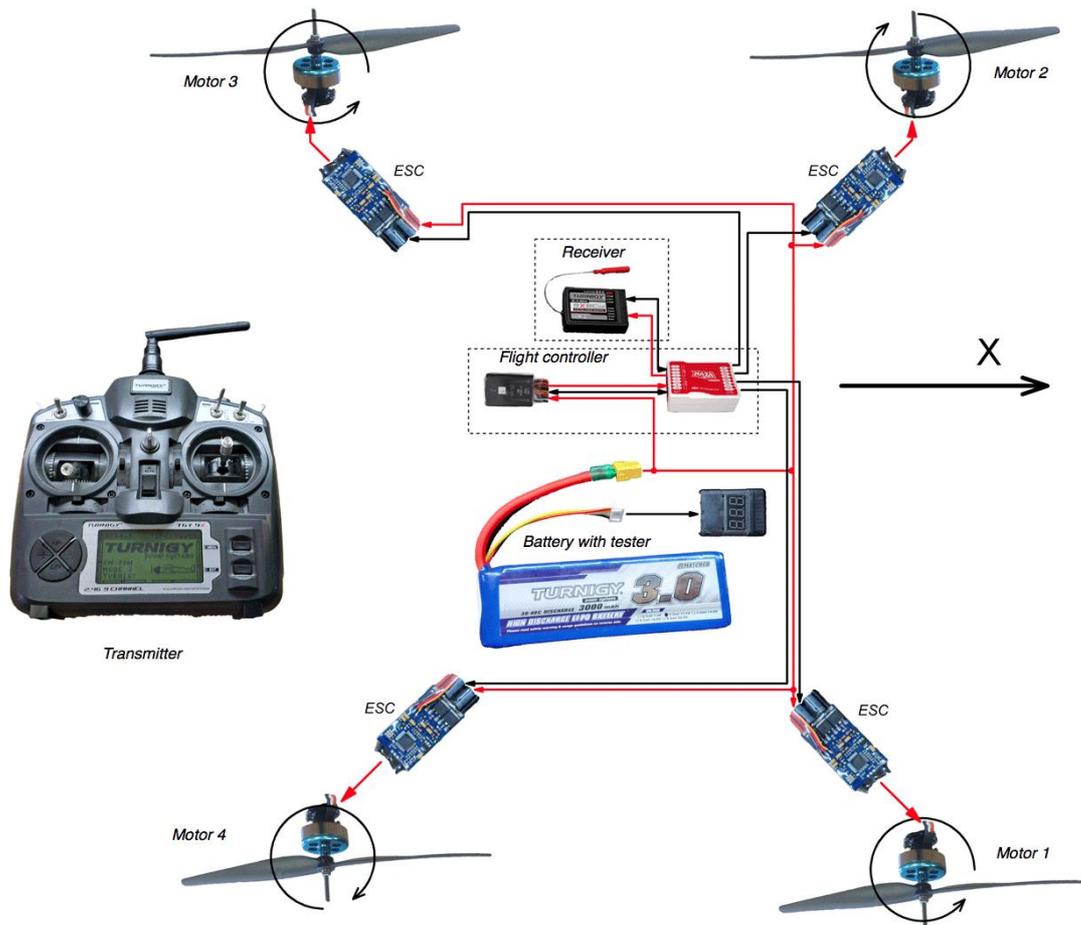


Figura 3-15. Esquema de los componentes de un multirrotores.

3.4 Opciones de modelo

En todo proceso de diseño hay varias variantes para alcanzar el objetivo, diversos caminos que seguir. En el caso de este proyecto, la fase de diseño pasa primeramente por las diferentes geometrías y formas que nos permitan salvar los parámetros de diseño anteriormente expuestos.

Sobre la estructura se van a abordar 5 de los 7 parámetros de diseño que son las colisiones, la resistencia a impactos, la impermeabilidad, la flotabilidad y la maniobrabilidad y dimensiones.

En primera instancia, la estructura del aparato de 6 motores (hexacóptero) debía constar de 6 brazos iguales anclados a la zona central donde se situaría el procesamiento del aparato, emulando una estructura de barras sencillas como en los aparatos de las imágenes, siendo estos los más comunes. (Figuras 3-16, 3-17 y 3-18).



Figura 3-16. Hexacóptero de barras.



Figura 3-17. Hexacóptero de anillos.



Figura 3-18. Hexacóptero de barras distinta longitud.

Estructura sobre la cual es preciso trabajar refuerzos para las colisiones e impactos. Dichos refuerzos pasan por dos grupos, los refuerzos para paliar las colisiones del propio aparato con las paredes, y los refuerzos capaces de paliar los impactos contra el aparato. Estos dos grupos de refuerzos se van a abordar para tratar de crear una solución conjunta.

Para resistir las colisiones es preciso reforzar la propia estructura de brazos además de proteger la zona de motores con sus hélices. Para reforzar los brazos es preciso crear una tipología de brazo recto con refuerzos en su unión, puesto que actúan como vigas en voladizo sometidas a cargas en el extremo. En las siguientes imágenes podemos observar refuerzos y tipologías de vigas propias de otras estructuras. (Figuras 3-19 y 3-20)

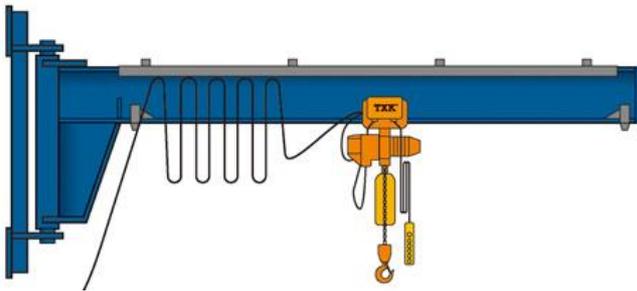


Figura 3-19. Refuerzo en base de viga voladiza.

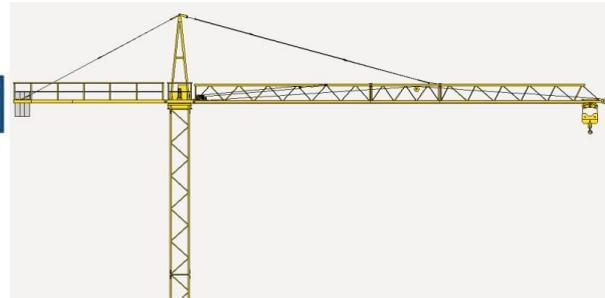


Figura 3-20. Estructura triangulada de viga voladiza con cables de refuerzo.

Junto con los refuerzos de los brazos cabe considerar la protección de los motores, los cuales admiten diferentes tipologías de protección. La idea es enjaular los motores para protegerlos frente a colisiones e impactos, y existe una solución muy extendida para protegerlos frente a las colisiones mostrada en la (Figura 3-21). En esta solución podemos encontrar un claro problema que es la posibilidad de impactos verticales sobre las hélices, por lo que es preciso modificar dicha solución para conseguir una protección total. Se trata de cerrar la jaula, no solo proteger los laterales, sino toda la hélice. Una de las soluciones más factibles es el cerramiento con una cúpula el mismo motor de la siguiente manera. (Figura 3-22).



Figura 3-21. Cuadricóptero de aro protector.



Figura 3-22. Rotor con jaula protectora.

De esta manera se puede proteger frente a impactos de objetos de dimensiones considerables, otra posibilidad que cabe añadir a la cúpula es una malla metálica del tipo mosquitera que se puede encontrar en cualquier casa. Sólo así podremos conseguir un grado de protección total frente a pequeños objetos.

Otro de los puntos a tener en cuenta en el diseño de los brazos no son solo los refuerzos en el empotramiento con la zona central del cuerpo, sino también considerar diferentes configuraciones para los brazos. A continuación, se van a plantear 3 tipos de brazos, comenzando por el caso más simple:

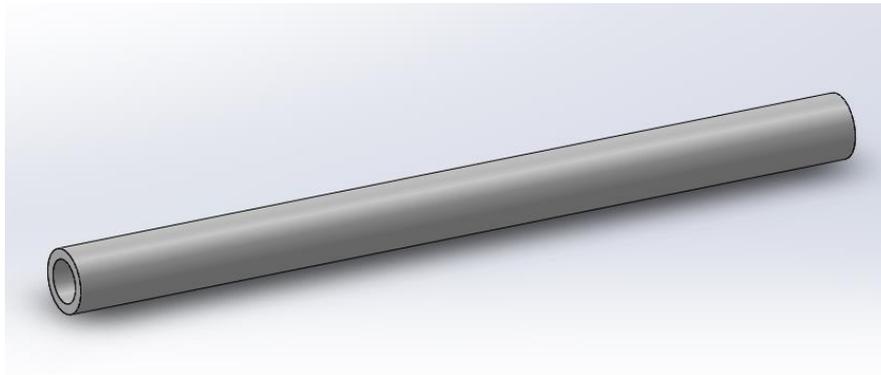


Figura 3-23. Brazo de rotor sencillo.

1. Este brazo sencillo (Figura 3-23) en forma de barra simple es la solución más extendida en el diseño de drones multirrotores, donde el perfil del brazo es un perfil circular que permite la mejor distribución de esfuerzos sobre el mismo en cualquier dirección. Con el concepto de viga podemos encontrar otros perfiles, tanto perfiles abiertos como cerrados. La elección del perfil cerrado circular se basa en que a priori desconocemos la dirección de los esfuerzos a los que se somete la viga, siendo esta la que permite la misma resistencia en todas las direcciones de esfuerzo.

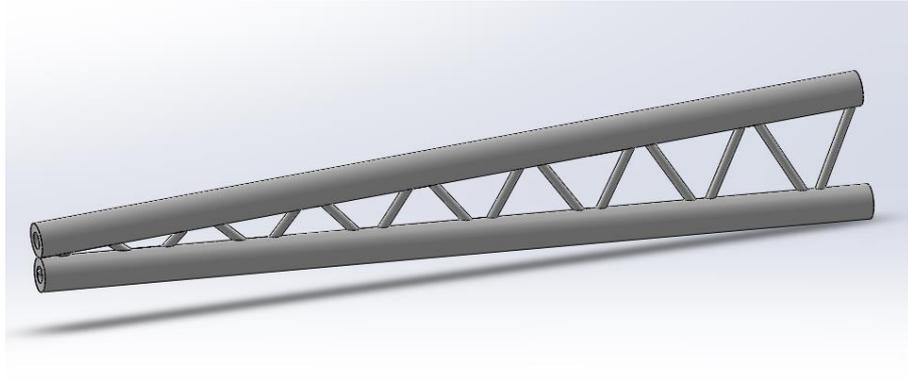


Figura 3-24. Brazo de rotor doble.

2. El siguiente modelo de brazo (*Figura 3-24*) pasa por reconocer un claro esfuerzo en la dirección vertical del aparato, donde se presta más atención a los esfuerzos propios de la sustentación de la hélice. Dicho esfuerzo conjunto de sustentación de todas las hélices permite la movilidad del aparato, y con este diseño se aporta una rigidez superior con respecto a los esfuerzos principales considerados, siendo un modelo de doble brazo.

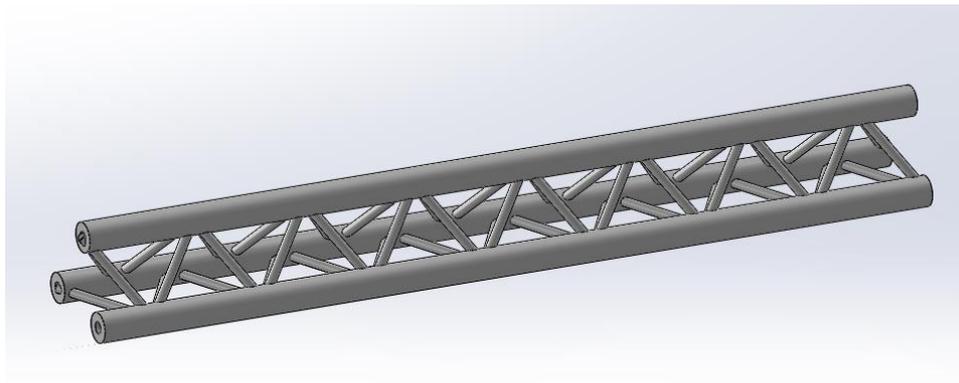


Figura 3-25. Brazo de rotor triple.

3. Como última opción de modelo (*Figura 3-25*) que se asemeja al criterio tomado en el modelo anterior, solo que esta vez se consigue una rigidez y resistencia superior no solo en la dirección vertical, sino en todas las direcciones. Este modelo de triple brazo podemos encontrarlo en muchas estructuras metálicas y se ha concebido inspirado en dichas estructuras.

Expuesta estas tres opciones cabe decir que existen muchas más tipologías no consideradas, que para el problema en estudio carecen de interés con respecto a las anteriores. Aunque de igual manera para futuras transformaciones del modelo podrán considerarse opciones de mayor complejidad y resistencia.

Para seguir con el desarrollo, habiendo considerado la estructura primitiva, los brazos del modelo y sus protecciones de hélices, pasamos ahora al estudio de la parte central del cuerpo donde se aloja el centro de operaciones del aparato.

Para la zona central del cuerpo, cabe destacar dos parámetros de interés en su estudio, que son la rigidez que aporta al conjunto de brazos y la protección del cerebro del aparato. Dicha rigidez y

protección se abordarán en dos partes, primero la estructura y luego la protección adicional a la misma.

Comenzando con la estructura, partimos de un modelo simple y usual en este tipo de multirrotores, una caja rectangular o circular que contenga la electrónica del mismo. A continuación, en las imágenes podemos apreciar algunas soluciones muy extendidas en estos aparatos (*Figuras 3-26 y 3-27*).



Figura 3-26. Caja rectangular en carbono.

Figura 3-27. Caja cuadrada en chapa de aluminio.

En estas soluciones se juega con el material y espesores debido a la sencillez estructural del mismo, siendo en la mayoría de los casos la solución más óptima.

Para tratar de optimizar el material y la rigidez estructural, y además gracias a las tecnologías de fabricación que se aplicarán en este documento, se podrá incurrir en complejas geometrías de estructuras.

En el primer modelo de cierta complejidad estructural, se considera una geometría hexagonal siendo igualmente válida una geometría circular. El haberse decantado por la solución hexagonal es debido a la facilidad de implementación de los brazos en la misma. Inicialmente se ha considerado una estructura de doble piso de hexágonos concéntricos, concibiendo en cada lateral del hexágono 4 puntos de apoyo para brazos de viga simple o de doble viga. Dichos 4 puntos de apoyo aumentan considerablemente la rigidez del empotramiento consiguiendo con ello una elevada rigidez conjunta. En la parte central podemos distinguir una cavidad de prisma hexagonal donde está previsto alojar la electrónica y equipo de procesamiento del multirroto. En la siguiente imagen se puede apreciar la geometría del cuerpo central. (*Figura 3-28*)

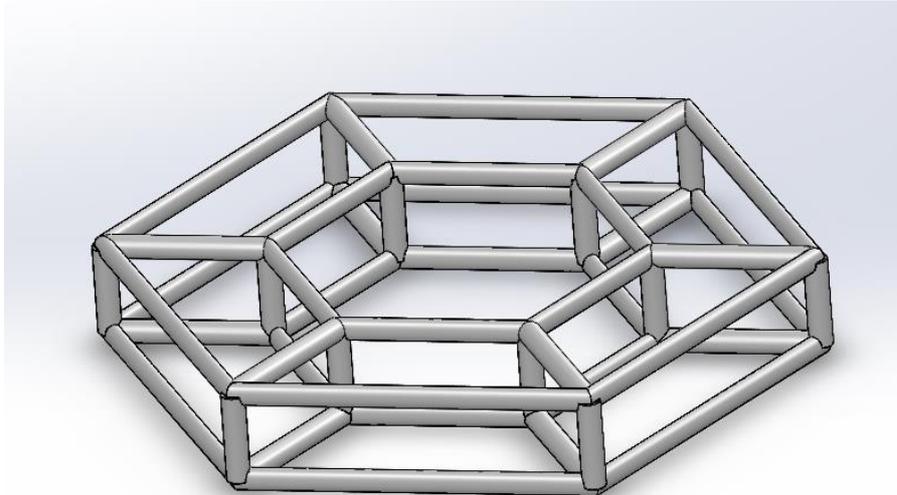


Figura 3-28. Cuerpo de caja hexagonal.

Dicha geometría resulta idónea para anclar los brazos a la estructura. Aun así, en una segunda iteración de diseño de la misma, se ha considerado la reducción del peso y complejidad, pasando ahora a 3 puntos de apoyo para los brazos. Quedando un corte transversal de la estructura de manera trapezoidal donde en la parte inferior se proporciona el apoyo, a su vez conectado con arriostramientos transversales y verticales para la conexión de los dos planos del cuerpo como se muestra a continuación. (Figura 3-29).

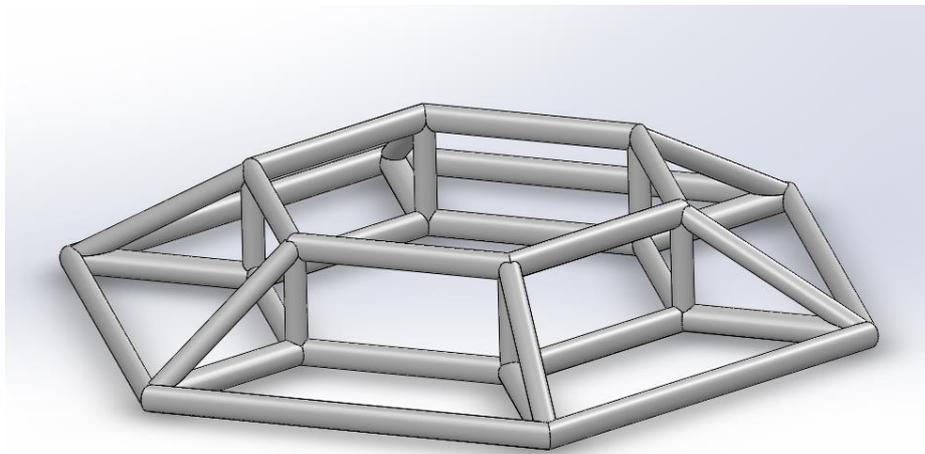


Figura 3-29. Cuerpo hexagonal modificado.

Con este modelo se consigue reducir notablemente el peso de la estructura a costa de una menor rigidez estructural.

Como última opción de diseño planteada para la parte central del cuerpo, se va a incurrir en un modelo sencillo, recurriendo al argumento anterior: las soluciones más extendidas son cajas simples jugando con los materiales y el grosor de las paredes. Dicho diseño consiste en un anillo circular al que se pretende implementar un suelo y un techo para encerrar los procesadores y protegerlos. En dicho modelo se consideran agarres extendidos para brazos de viga circular simple. Quedando el

modelo de la siguiente manera. (Figura 3-30)

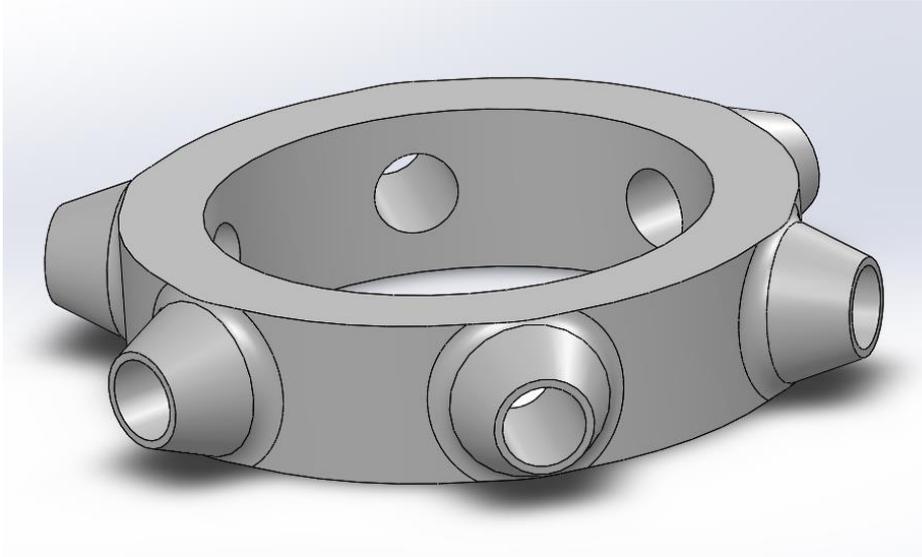


Figura 3-30. Cuerpo de anillo perforado.

Donde posteriormente se mostrarán mejoras del mismo optimizando la estructura y el peso del mismo.

Una vez tenemos ciertas consideraciones para los motores brazos y cuerpo, teniendo en cuenta la protección de los motores y de la caja de procesamiento, toca idear un sistema de protección global del aparato.

Hay que tener en cuenta que, aunque se blinden cada una de sus partes para evitar la rotura de las mismas, es de suma importancia conseguir que el aparato sea capaz de remontar el vuelo ante cualquier situación inesperada. Este es el caso de una posible colisión o impacto que consiga que el multirroto acabe en el suelo, y en el peor de los casos si esto ocurriera lo hiciera cara abajo, lo que imposibilitaría su despegue con la consiguiente pérdida del mismo.

Adicional al blindaje hay que considerar un sistema que permita el despegue en caso de caída y que nos asegure que la caída se produzca en la posición favorable para su despegue. Todo este planteamiento pasa por pensar en un sistema de flotación adecuado y de conseguir un centro de gravedad idóneo para caídas favorables.

Comenzando por un sistema general contra impactos, más allá de las jaulas individuales de los motores, existen varias opciones, unas más válidas que otras.

En una primera instancia se pensó en un sistema de paraguas contra impactos verticales y colisiones horizontales (Figura 3-31). Dicho sistema consiste en un modelo de paraguas o sombrilla anclado a la caja central de procesamiento, el cual cubre toda la superficie superior del aparato. Dicho sistema de sombrilla/paraguas posee un par de rotación para su libertad de giro, por lo que es capaz de para impactos verticales y además evitar el giro sobre sí mismo del multirroto en caso de colisiones con la pared, rodando dicha sombrilla contra la pared de manera lateral como si de una rueda que va por el suelo se tratase.

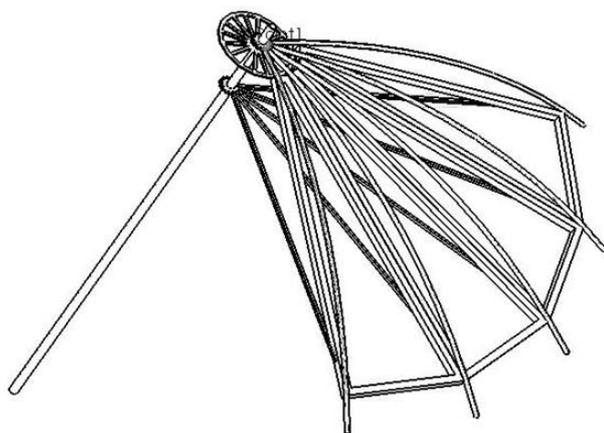


Figura 3-31. Mecanismo de paraguas giratorio. Figura 3-32. Dron con protección cilíndrica.

Es fundamental dotar a este sistema de cierta flexibilidad, además de la posibilidad de cubrir el sistema con una malla fina del tipo mosquitera como en el caso anterior de jaula para los motores. Cabe destacar que implementando este sistema no sería necesario la protección en jaula de los motores, puesto que dicha protección correría ahora a cargo de la sombrilla.

En relación a lo anterior cabe otra posibilidad, que es duplicar el sistema anterior situado en la parte superior, para aplicarlo también a la parte inferior del dron. De esta manera se consigue una zona cilíndrica de protección total contra las adversidades. La *Figura 3-32* muestra un ejemplo de un dron comercial con protección cilíndrica, a diferencia del planteado, éste tiene unidos las sombrillas cerrando el cilindro y además el cilindro está orientado en el plano horizontal, formando 90° con el modelo planteado.

Es importante resaltar que, en esta opción de sombrilla doble, la rodadura sobre la pared sería más efectiva, siendo posible además implementar un sistema de flotación en la sombrilla inferior, consiguiendo así también bajar el centro de gravedad a la vez que obtenemos la flotación necesaria.

La idea de protección total en una segunda instancia evoluciona hacia un sistema de encapsulación total del aparato, convirtiendo el mismo en una esfera voladora. En este concepto de bola de hámster aparecen nuevas incógnitas, como es la de conseguir una esfera móvil frente al aparato multirroto. La idea de dotar a la esfera de grados de libertad pasa por la concepción de unas conexiones multirroto-esfera capaces de permitir direccionar el aparato sin movimiento relativo de la esfera frente al mismo.

Este concepto de esfera, permite el movimiento por el conducto a través de la rodadura con las paredes o techo, además de por el espacio aéreo del mismo. En este modelo dividiremos el diseño en dos grupos, el del diseño de la esfera, y el del diseño de los mecanismos de conexión que doten de grados de libertad al aparato.

Comenzando por el mecanismo de unión, la única opción viable parece ser la de un mecanismo de giroscopio capaz de dotar al aparato de 3 grados de libertad de rotación frente a la esfera, estos mecanismos hoy en día son bien conocidos. (*Figura 3-33*)

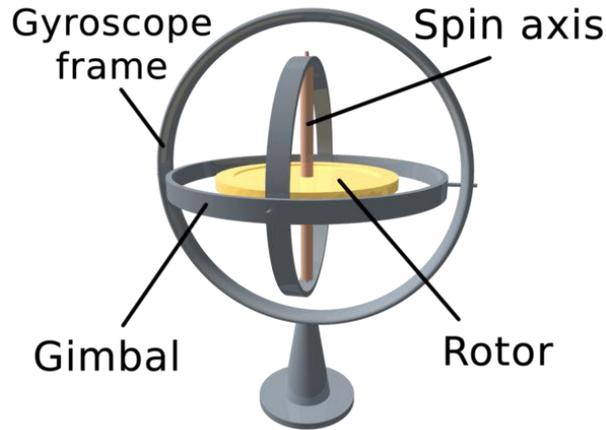


Figura 3-33. Mecanismo de giroscopio con sus componentes.

De esto se puede sacar dos variantes para la concepción del mecanismo de giro para el aparato.

La primera de las variantes consiste en dos anillos concéntricos con 2 uniones por anillo en la dirección de uno de los diámetros. Para conseguir un efecto óptimo de giro la unión del anillo exterior con la esfera y la unión del anillo exterior con el anillo interior, deben realizarse ambas uniones de pares rotación perpendicularmente en dos de los diámetros del anillo externo e interno. Dicho sistema se puede apreciar en la imagen a continuación. (*Figura 3-34*)

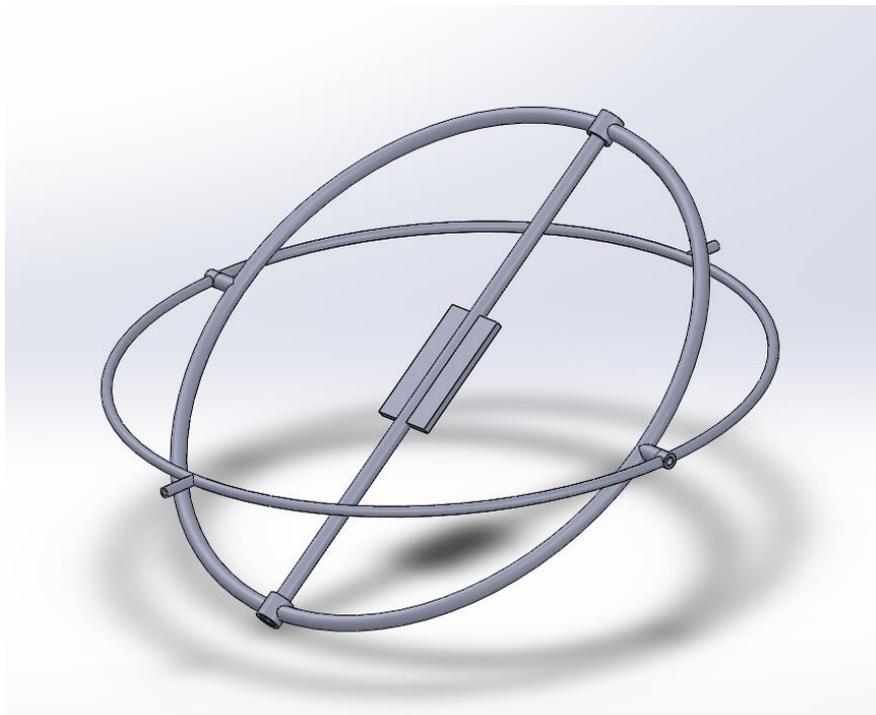


Figura 3-34. Modelo giroscopio de anillos concéntricos.

Donde se puede apreciar que los ejes de rotación de ambos anillos forman 90 grados. Internamente a ambos anillos se coloca una barra recta unida en dos puntos del anillo interior mediante pares rotación, el nuevo eje de rotación debe también formar 90 grados con el anillo interior pero no con el exterior para así conseguir un efecto de giro óptimo. El completo de los dos anillos y la barra interior,

hacen un total de 3 grados de libertad de rotación de los 3 elementos.

La otra variante para el mecanismo giroscopio es sustituir uno de los anillos por una barra, de esta manera conseguir un mecanismo formado por un anillo y dos barras unidos todos mediante pares rotación. En la siguiente imagen se puede apreciar la conjunción de estos nuevos elementos. (Figura 3-35).

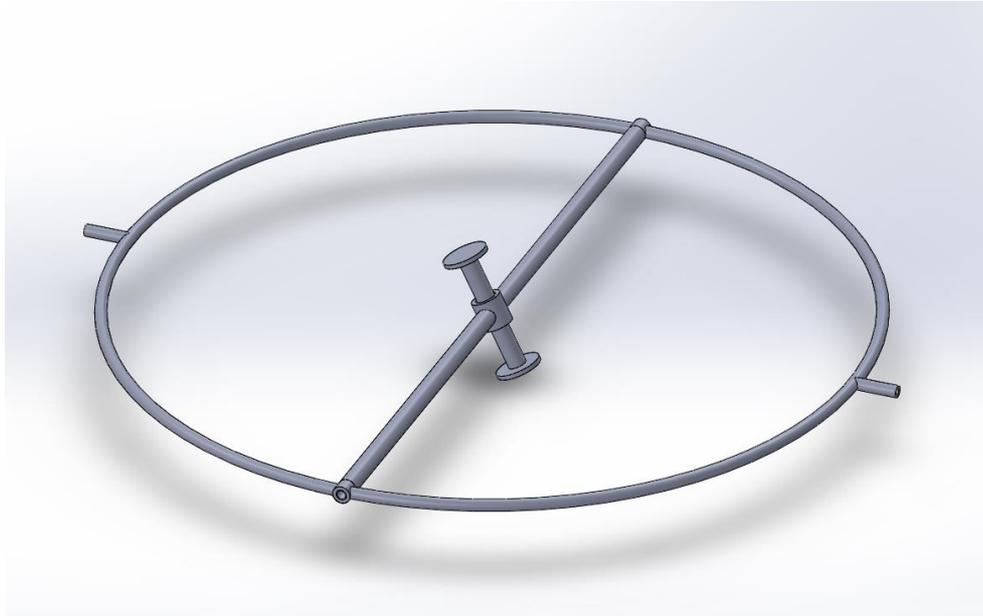


Figura 3-35. Modelo giroscopio de anillo único.

Donde la disposición de los elementos al igual que el caso anterior, consigue que los ejes de rotación sean perpendiculares entre ellos. En este caso cambia el segundo elemento de unión que, en lugar de ser un anillo interior, es una barra con los pares de rotación situados igual que el anillo al que sustituye. Para el tercer elemento, se puede considerar una barra de dimensiones reducidas unida mediante solo un par rotación en el centro de la barra anterior. Al ser corto este último palo, la unión de rotación se mantendrá en su posición perpendicular al eje de rotación anterior.

Ambas opciones son igualmente válidas, la de doble anillo a priori optimiza mejor la rotación, aunque todo ello depende de la calidad de fabricación del par rotación. Sin embargo, la de anillo simple y barras permitirá ahorrar en peso, lo cual es fundamental a la hora de concebir un multirrotor.

Más adelante en este documento se establecerá el modelo final argumentando sus ventajas y detallando su geometría.

Una vez establecido el cuerpo del aparato en cuestión, junto con el mecanismo de unión del mismo con la esfera, queda por definir la propia esfera. A continuación, se barajarán diferentes opciones para la construcción de la esfera protectora.

Primeramente, se debe tener en cuenta que este proyecto, como bien está indicado a su comienzo, su objeto principal es el de la inspección del alcantarillado de la ciudad, y en el alcance de este documento se considera la inspección visual como única opción de inspección. Ello implica que la esfera de protección a diseñar debe permitir la visibilidad de la cámara de video que se implementará en el aparato. Por lo tanto, se traduce en un único tipo de estructura viable, puesto que el cerramiento completo de la esfera con cualquier tipo de material transparente, imposibilitaría el vuelo del mismo.

Como se ha mencionado, la única opción viable es crear una estructura esférica de barras que permita la visión, y que además solo funcione como barrera a colisiones, permitiendo penetrar sin

dificultad el aire y posibilitando la rodadura del aparato. Para esta esfera estructural existen muchos conceptos de estructura, algunos de los cuales se muestran a continuación de manera visual para su comprensión (*Figuras 3-36, 3-37 y 3-38*):

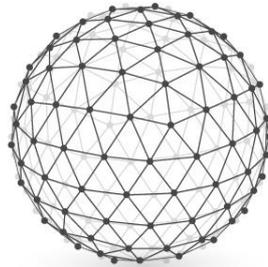
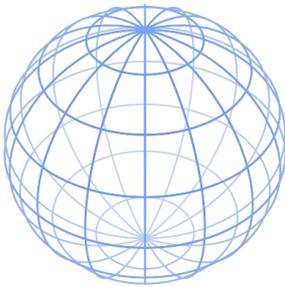


Figura 3-36. Esfera de meridianos. Figura 3-37. Esfera triangulos.

Figura 3-38. Icosaedro truncado.

De todos estos ejemplos, el más viable tanto en la resistencia estructural como en la homogeneidad, y sobre todo en la simplicidad, es el ejemplo del icosaedro truncado. Cuerpo geométrico definido de manera homogénea por pentágonos y hexágonos regulares que permiten su construcción a partir de relaciones matemáticas para las dimensiones de sus aristas. Dicho cálculo de relaciones para la geometría definitiva del modelo se presentará más adelante en este documento.

La elección de este modelo de esfera permite varias formas de construcción y ensamblado, de las cuales presentaremos dos opciones viables a continuación.

La primera forma, que destaca por su rigidez estructural y su facilidad de ensamblado, no es más que la creación de este icosaedro truncado por caras al igual que los cosidos de los balones de futbol se hacen por parches. En nuestro caso no serán parches opacos, simplemente se crearán pentágonos y hexágonos de una sola pieza. En la imagen a continuación podemos ver los modelos de hexágonos y pentágonos a fabricar de una sola pieza. (*Figuras 3-39 y 3-40*).

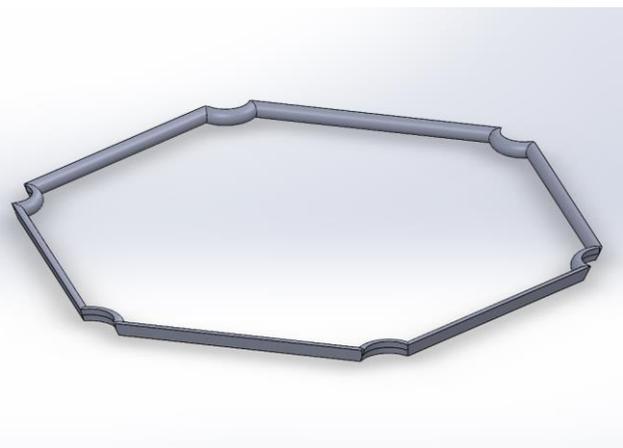
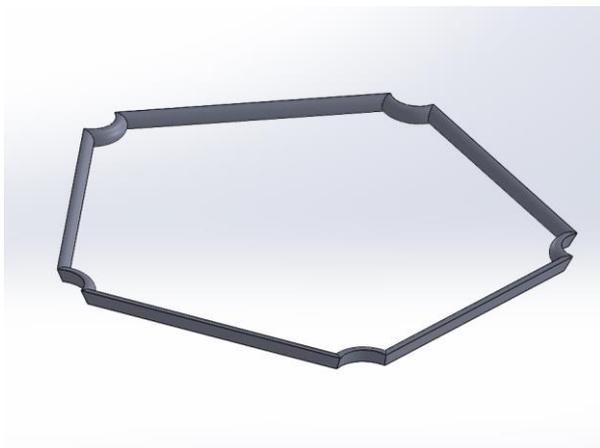


Figura 3-39. Parche pentagonal.

Figura 3-40. Parche hexagonal.

Estos polígonos estructurales, además de ser sólidos individualmente, aportan una rigidez conjunta cuando se encajan unos con otros. Esta opción es buena de cara a la reparación durante el

funcionamiento, solo basta con sustituir las piezas por otras nuevas, de fácil montaje. A continuación, se puede apreciar el ensamble de las piezas en la siguiente imagen del montaje. (Figura 3-41)

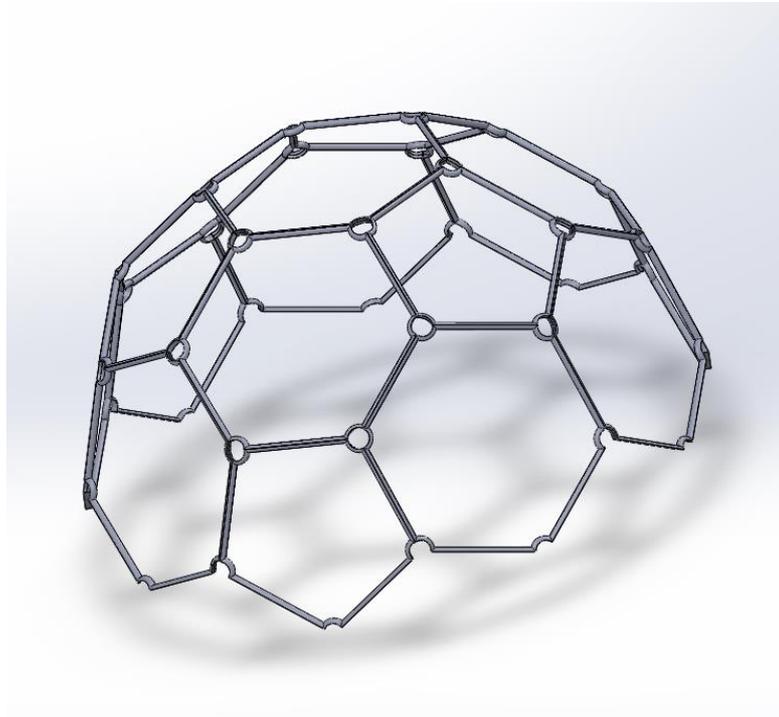


Figura 3-41. Ensamble de icosaedro truncado a parches.

La segunda opción es más simple y quizás más fácil de fabricar, aunque de un ensamblado algo más complejo. Consistente en un modelo de icosaedro truncado compuesto por aristas y vértices, donde los vértices son diseñados específicamente para la orientación correcta de las aristas y para dar rigidez al ensamble.

Ahora en este nuevo modelo donde se obtienen vértices por un lado y aristas en forma de barras por otro. Jugando esta vez con los materiales y la resistencia de la unión aportada por los vértices, se pueden conseguir buenas cohesiones estructurales en el que el material trabaje correctamente para aportar resistencia al conjunto. Esta opción de ensamble es más común, más extendida para la creación de estructuras esféricas y podemos encontrarla en otras soluciones como la que se muestra a continuación. (Figura 3-42).

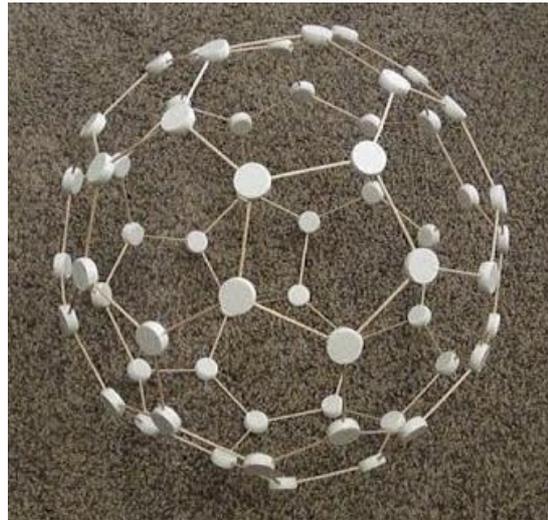


Figura 3-42. Ensamble de barras de icosaedro truncado.

Una gran ventaja que aporta esta opción sobre la anterior, es que va a permitir disminuir el peso del modelo, puesto que en la primera opción solo trabajamos un material para obtener una forma algo complicada solo posible al alcance de los plásticos. Con el modelo de barras y vértices se puede usar materiales como la fibra de carbono, el aluminio o el acero en alambre para las barras, mientras que los vértices de geometría específica con algún tipo de plástico.

Es una opción de más difícil ensamble y reparación puesto que las uniones hay que realizarlas vértice a vértice y barra a barra, lo que aumenta considerablemente el tiempo de montaje.

Cabe añadir que en ambas opciones es posible implementar un mallado de protección en las caras del icosaedro truncado para conseguir una protección total, siempre teniendo en cuenta que para el alcance de este proyecto es necesaria la visión a través de la esfera, considerando de esta manera la única opción de un mallado que permita la máxima visibilidad.

Una vez estudiada las dos opciones de esferas protectoras solo queda considerar para el conjunto completo de multirroto, giróscopo y esfera, un sistema de flotación idóneo. Teniendo en cuenta uno de nuestros parámetros de diseño, el de la flotación, el sistema necesario para cubrir esta necesidad se antoja simple y sencillo. Aunque existen diversas opciones, el sistema es simple: es necesario desplazar una cantidad de agua suficiente que su empuje iguale al peso del aparato.

Aunque la solución es única (aporte de material para la flotabilidad del aparato), existe varias configuraciones donde establecer el sistema de flotación.

La primera de las opciones consiste en aportar el material flotante en la esfera de protección, consiguiendo de esta manera la rodadura por la superficie del agua. Aunque se antoja como la solución idónea permitiendo así la rodadura del aparato por todas las superficies posibles, esta solución va en detrimento de la visibilidad a través de la esfera. Contando con los 60 vértices y 90 aristas del icosaedro truncado, sería posible reforzar los mismos de un material hidrófobo tipo espuma. El cálculo del material hidrófobo es sencillo, el volumen es el volumen de agua necesario desplazar para igualar el peso del aparato en su conjunto. A continuación, se puede apreciar un ejemplo que se asemeja a la solución en cuestión, a falta de perforación de sus caras. (*Figura 3-43*)



Figura 3-43. Poliedros de poliestireno.

Esta solución a priori idónea, esconde un serio problema. El volumen total de material hidrófobo necesario para la flotación (igual al peso del aparato), debería ser aportado en cada uno de los vértices o de las caras. Puesto que la parte de material de flotación que no esté en contacto con el agua, no actuará para contribuir al efecto de flotación.

Esta es la razón que imposibilita la solución planteada, puesto que, a expensas de cálculos, es claro de ver que habría que aportar tanto material en cada vértice o cada cara, que no sería viable dicha solución.

Para la segunda opción, más sencilla que la anterior, se está perdiendo una ventaja muy atractiva de la primera. Visto el razonamiento anterior, la posibilidad de la rodadura por el agua no es una opción viable para las dimensiones de trabajo consideradas en este proyecto, aunque se antojaba atractiva la idea de una “bola voladora y todoterreno”.

En un plano más resolutivo encontramos la solución tipo “patines flotantes”, la cual consiste en unos patines de material flotante enganchados a la parte inferior del cuerpo del multirroto. Dicha solución se puede encontrar en algunos tipos de aeronaves como se puede apreciar a continuación. (*Figuras 3-44 y 3-45*).



Figura 3-44. Aeroplano de patines flotantes.



Figura 3-45. Hexacóptero de apoyos flotantes.

Solo es necesario adaptar esta solución que ya funciona a un aterrizaje vertical, lo cual pasaría por darle una forma de patines circulares en lugar de patines rectos, consiguiendo adaptar la superficie de apoyo al aparato en cuestión. La forma idónea para dichos patines se podría modelar como un

toroide. (Figura 3-46).



Figura 3-46. Toroide para el tren de aterrizaje.

Solo es necesario realizar el cálculo del volumen de material para la flotación del aparato, para distribuir dicho material de manera uniforme creando una superficie de apoyo.

Por último, para cerrar esta parte de opciones de modelo queda hacer una última consideración, consistente en el parámetro de diseño de la impermeabilidad.

Para lograr cierto grado de impermeabilización contra el agua, para la construcción del prototipo se debe considerar la protección del cuerpo del multirrotor, puesto que es aquí donde reside la electrónica del aparato. Debido a la complicación de hermetizar todo el conjunto, parece más razonable protegerlo contra salpicaduras, y no es más que usar un forraje de un material hidrófobo asegurando bien las uniones para la impermeabilización.

En este caso no se consideran varias opciones puesto que una vez montado el aparato real será la hora de considerar los agarres del forraje, el material idóneo y la forma del mismo para poder asegurar la impermeabilización del aparato.

3.5 Modelo final

Una vez establecidas las bases de las posibles opciones de desarrollo del modelo de una manera lógica y ordenada, tratando siempre de considerar varias opciones, llega el momento de definir un modelo definitivo para el prototipo. Todo ello con objeto de lograr un prototipo de proyecto apto para su funcionamiento y uso en el entorno de trabajo considerado.

En este apartado se va a definir completamente todos los componentes estructurales del modelo final. Se hará un repaso en un orden lógico de los mismo describiendo sus geometrías y mostrando su modelado final.

Comenzando desde dentro hacia afuera en el diseño, el primer grupo de piezas a considerar son las piezas que componen el multirrotor propiamente dicho, que serían el cuerpo y brazos del mismo.

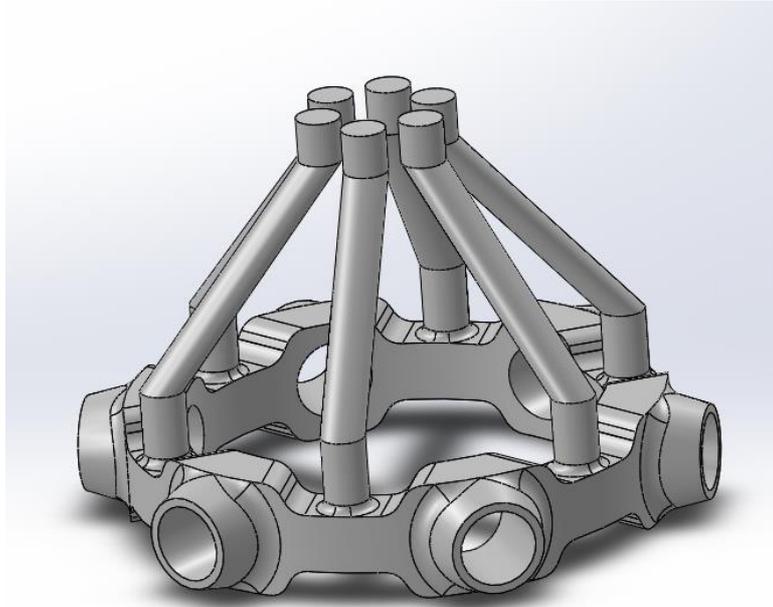


Figura 3-47. Cuerpo del multirrotor.

- Cuerpo (Peso 28g x 1 Pieza). *Figura 3-47.*

Es una pieza cuya función principal es dar soporte a los brazos del multirrotor y dar alojamiento a la parte de procesamiento del mismo para protegerla del entorno. Está compuesto por un aro de sección rectangular, el cual está perforado en 6 posiciones laterales equidistanciadas unas de otras, con extensiones en forma de saliente para asegurar el agarre de los brazos al mismo. Además de la cohesión de los brazos al anillo, se ha diseñado 6 cuerdas de agarre para la unión solidaria del anillo al resto del mecanismo giróscopo. En una versión inicial de la pieza el anillo mantenía su sección constante en su revolución, pero posteriormente con optimización topológica la pieza evoluciona a un anillo de sección variable, con lo que conseguimos reducir casi a la mitad el peso de la misma.

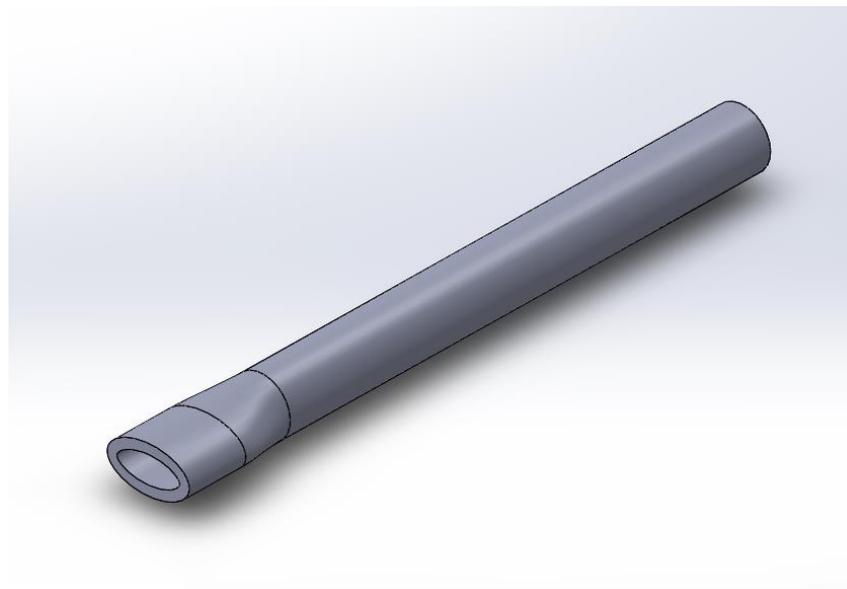


Figura 3-48. Brazo del multirrotor.

- Brazo del rotor. (Peso 6g x 6 Piezas). *Figura 3-48.*

Dicha pieza tiene como función principal dar soporte a los rotores del aparato, sirviendo de viga de unión entre el cuerpo del mismo y los rotores. Es una viga de perfil circular hueca, que en una de sus terminaciones adopta una forma elíptica para adaptarse a la unión con la jaula del rotor, mientras que en la otra terminación de la misma conserva su perfil circular para la unión encajada al cuerpo del multirrotor. Esta geometría de brazo permite separar de manera equidistante cada uno de los 6 rotores a una distancia de 10 cm formando un hexágono regular entre los ejes de los rotores.

- Pivote de par revolución.

Esta pieza es un conjunto de dos piezas macho y hembra, que componen la parte inferior y superior del conjunto respectivamente. La función principal de este conjunto es, junto con otra pieza que será descrita a continuación, formar un par rotación para conseguir el primer grado de libertad del giroscopio. La forma del mismo para permitir la rotación se asemeja a la de un diábolo, formado el mismo por dos conos invertidos y encontrados por sus puntas, para ello describiremos ambas partes del diábolo.

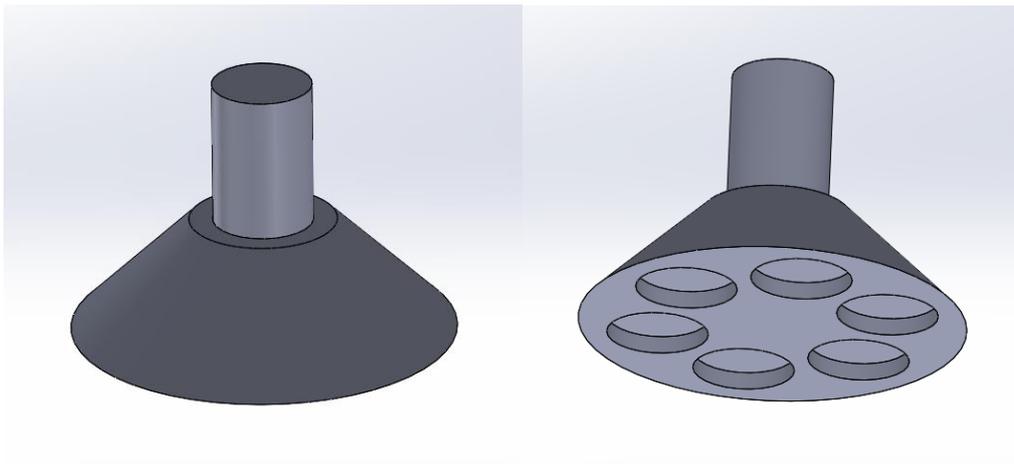


Figura 3-49. Pivote macho vista superior.

Figura 3-50. Pivote macho vista inferior.

- Pivote Macho (parte inferior). (Peso 2g x 1 Pieza). *Figura 3-49 y 3-50.*

La parte inferior al igual que la superior adopta la forma de un cono truncado que en su base esta perforado por 6 cavidades cilíndricas, cavidades que coinciden con los perfiles circulares del final de las cuerdas para la cohesión entre el cuerpo y la pieza del par revolución. En la parte truncada del cono (base superior) sobresale un vástago cilíndrico que hace el encaje macho de la unión.

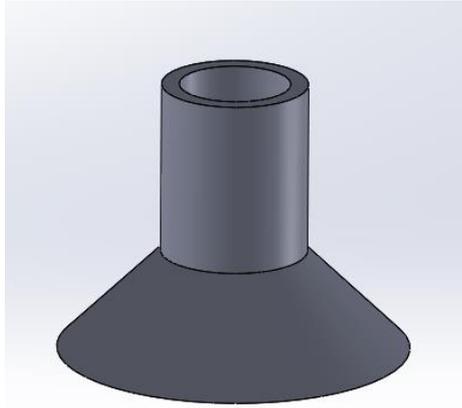


Figura 3-51. Pivote hembra.

- Pivote hembra (parte superior). (Peso 2g x 1 Pieza). *Figura 3-51.*

La parte superior adopta una forma similar a la inferior aportando cierta simetría a la pieza conjunta por el plano medio. En esta parte no existen perforaciones, y el vástago cilíndrico sobresaliente tiene una cavidad en su interior, haciendo las veces de encaje hembra para la unión.

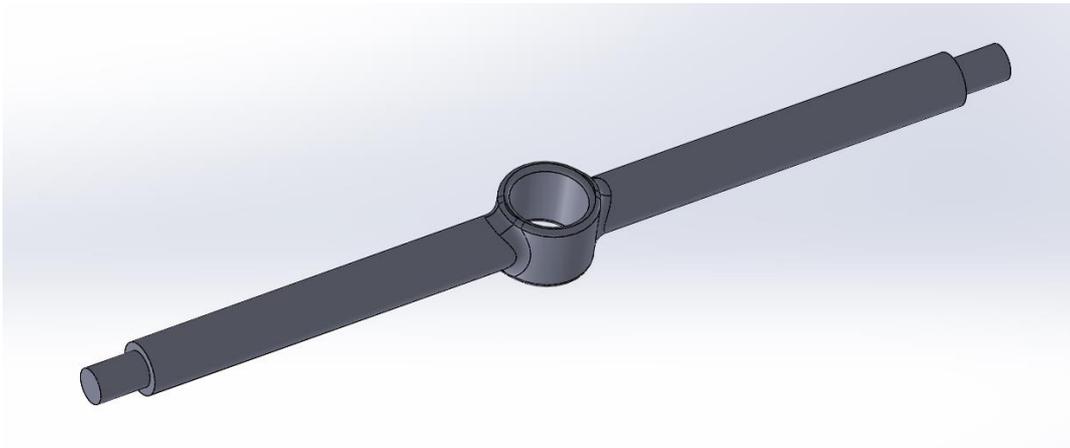


Figura 3-52. Tramo central de la viga.

- Tramo central de la viga. (Peso 10g x 1 Pieza). *Figura 3-52.*

Es la viga que completa el par revolución con el diábolo anteriormente definido, cuya función es formar parte de la estructura giroscópica para aportar los 3 grados de libertad necesario para su movimiento. Dicha viga representa el tramo central de la viga completa que tiene un perfil circular, debido a limitaciones en la fabricación hay que adaptar el diseño a 3 tramos independientes para después ensamblar en uno solo. Este tramo central de viga posee una peculiaridad con respecto a los otros dos tramos que conforman los extremos, el tramo central de viga circular está interrumpido por un cilindro con un agujero pasante, transversal a la dirección de la viga. Dicho cilindro central es la otra parte del par rotación anteriormente mencionado, donde se introducen los vástagos de ambas partes del diábolo para hacer la unión dentro del cilindro del tramo central, y conseguir de esta manera un par rotación de la viga interior con respecto al multirotor.

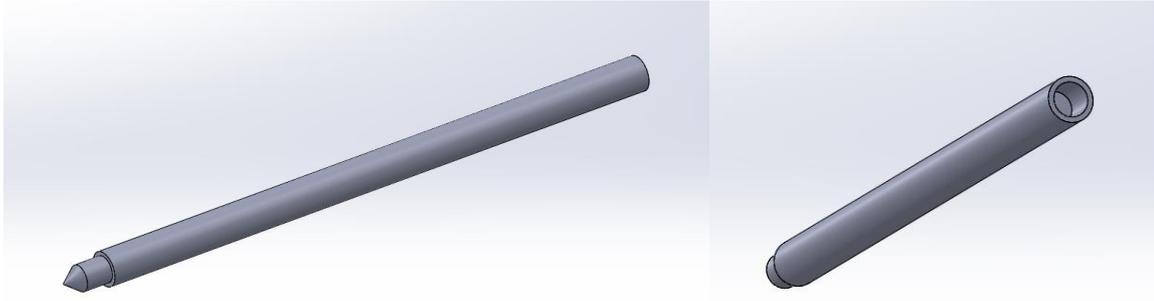


Figura 3-53. Tramo exterior de la viga. Figura 3-54. Tramo exterior de la viga (detalle).

- Tramo exterior de la viga. (Peso 9g x 2 Piezas). *Figuras 3-53 y 3-54.*

Esta es la viga que junto con la anterior e implementada la misma en ambos lados del tramo central, conforman la viga completa interior del giroscopio. Reiterando lo dicho, la concepción modular de esta pieza del giroscopio es debida a las limitaciones en la fabricación. La función es básicamente conformar una viga de sección circular para formar otro par rotación respecto a la siguiente pieza del giroscopio. Cabe destacar ambas extremidades de esta pieza, puesto que bien para la unión con el tramo central, o para la unión de rotación con el anillo exterior del giroscopio, adoptan una peculiar geometría. El extremo exterior tiene forma cónica, de punta de lápiz, el cual hará contacto en la punta mediante presión del conjunto anillo exterior / viga interior, lo cual dotará al conjunto de un único apoyo por cada extremo de la viga, minimizando el rozamiento y permitiendo el par rotación. Gracias a la cavidad diseñada en el anillo exterior dicho contacto puntual por ambos extremos siempre estará en su posición correcta impidiendo los demás grados de libertad del par. De la unión con el tramo central se entrará en detalle más adelante en este documento, en el apartado del ensamblado.

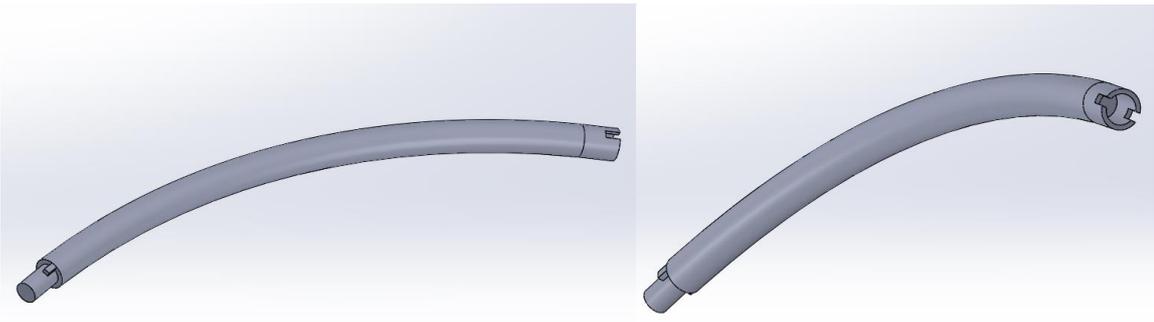


Figura 3-55. Tramo de anillo simple. Figura 3-56. Tramo de anillo simple (detalle).

- Tramo de anillo simple. (Peso 10g x 4 Piezas). *Figuras 3-55 y 3-56.*

Para conformar el anillo exterior, cuya función es dar soporte a los grados de libertad restantes y estabilidad estructural al conjunto, es necesario modelar a tramos, debido a las limitaciones dimensionales de la fabricación. Para ello el anillo exterior quedará dividido en 8 tramos, de los cuales existen 3 tipologías diferentes, entre los cuales se encuentra el tramo simple, el de unión con la viga interna y el de unión con la estructura esférica exterior. La

forma de abordar el diseño de los 3 tipos de tramo nace en el tramo simple, una barra curva de 26 cm de radio de circunferencia de sección circular constante de 1 cm de diámetro. Dicho tramo curvo cubre 45° del anillo completo, al que cabe añadir conexiones macho-hembra en los extremos para su ensamblaje. De este tipo de tramo se usarán 4 para conformar el anillo al completo, utilizando las mismas conexiones macho-hembra para las otras dos tipologías de tramos.

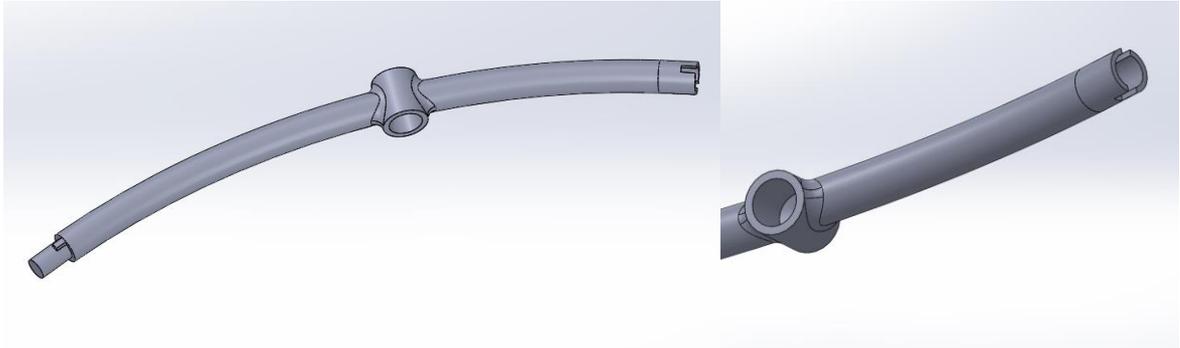


Figura 3-57. Tramo de anillo interior.

Figura 3-58. Tramo de anillo interior (detalle).

- Tramo de anillo interior. (Peso 12g x 2 Piezas). Figuras 3-57 y 3-58.

Al igual que el anterior, su función es conformar el anillo exterior que da soporte al conjunto. En este caso, el tramo curvo simple se ve interrumpido a la mitad por un apoyo para la viga central del giroscopio. Dicho punto de apoyo, adopta una geometría cilíndrica que interrumpe la continuidad del tramo, unido de manera solidaria a este. Dicha geometría cilíndrica con su respectiva cavidad concéntrica para la conexión con la viga interior, está orientado de forma normal a la curvatura circunferencial del anillo, apuntando en dirección del radio hasta el centro del mismo. La peculiaridad que posee esta cavidad cilíndrica es que el lugar de acabar en base plana, acaba su hendidura en una base cónica, con un ángulo de punta del cono mayor que el ángulo de punta de la viga central, para de esta manera permitir el contacto entre ambas piezas de manera puntual, logrando la rotación necesaria para el par revolución y evitando el desencaje del mismo gracias a la protección que da la cavidad cilíndrica con su pared. De este tipo de tramo van a ser necesarios dos para soportar ambos extremos de la viga interior del giroscopio.

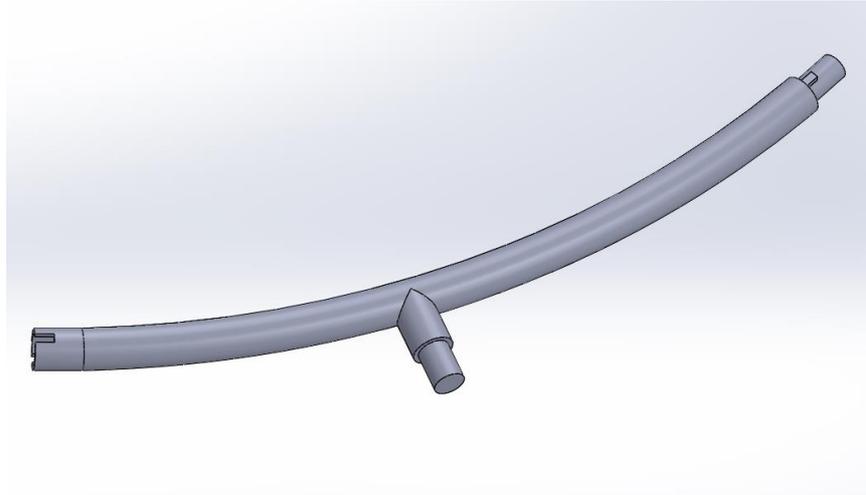


Figura 3-59. Tramo de anillo exterior.

- Tramo de anillo exterior. (Peso 11g x 2 Piezas). *Figura 3-59.*

Como las otras dos tipologías de tramos comparte la función de conformar el anillo exterior del giroscopio que da soporte al conjunto. Misma geometría y uniones que el tramo simple, pero en este caso la interrupción de su curvatura a la mitad no es total como en el caso anterior, ahora solo se considera un saliente desde el tramo simple, en dirección normal al anillo de manera perpendicular al tramo. Dicho saliente no es más que una conexión macho adicional, esta vez no para ensamblar el anillo conjunto, sino para conectarlo con la estructura exterior del multirroto. Esta conexión macho no posee ninguna característica especial con respecto a las anteriores, solo sirve para conectar el mecanismo de rotación con respecto a la esfera protectora exterior, que se explicará a continuación, y que comparte geometría con la conexión de rotación del cuerpo del multirroto con el giroscopio. De este tipo de tramo serán necesarios dos para completar los 8 tramos del anillo, y tener la cogida a la esfera exterior en dos puntos.

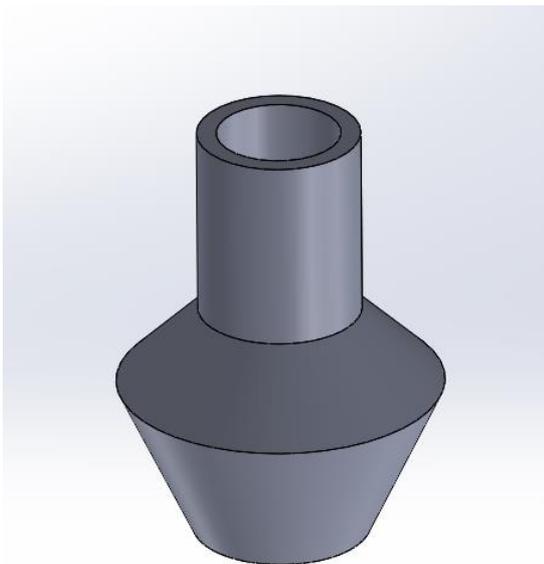


Figura 3-60. Diábolo hembra.

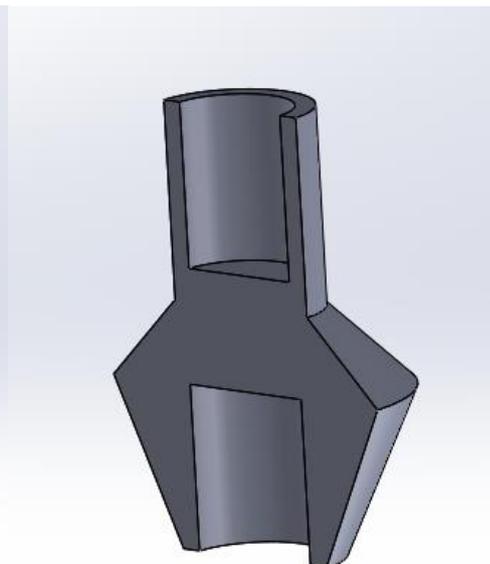


Figura 3-61. Corte vertical diábolo hembra.

- Diábolo hembra. (Peso 2g x 1 Pieza). *Figuras 3-60 y 3-61.*

Esta pieza junto con otra más forma parte del diábolo de rotación diseñado para la unión esfera exterior con el anillo del giroscopio, cuya función es servir al igual que en el caso anteriormente mencionado de par de rotación. De esta manera se completan los 3 grados de libertad necesarios para la rotación libre de la esfera protectora frente al multirrotor. La geometría considerada para este caso es similar a la del diábolo anterior, con una peculiaridad, la mitad colocada en el interior del anillo tiene forma de conos truncados encontrados por las bases. Posee además un vástago cilíndrico hembra como extensión, para modular el diábolo en dos piezas que encajan dentro de una camisa cilíndrica para su rotación.

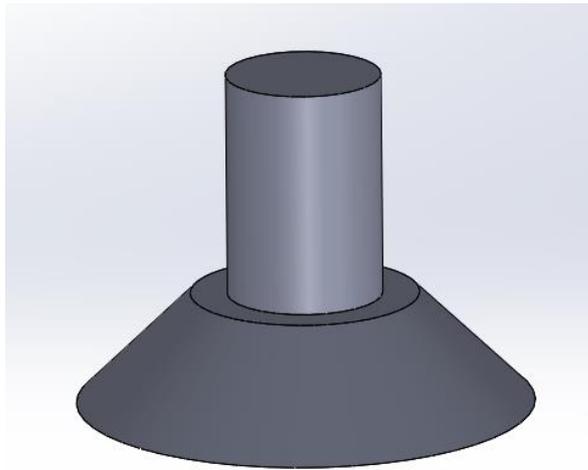


Figura 3-62. Diábolo macho.

- Diábolo macho. (Peso 1g x 1 Pieza). *Figura 3-62.*

Junto a la pieza anterior forma parte del diábolo y ha sido diseñada en este caso con una extensión macho. La finalidad del encaje macho-hembra es encerrar bajo los ensanches de ambos conos, la camisa cilíndrica que va a rotar con respecto al diábolo. De esta forma el contacto entre la camisa cilíndrica o cilindro hueco con el diábolo, con los vástagos como estrechamiento central, constituyen un par rotación con una línea de contacto entre los bordes de la camisa y las zonas cónicas del diábolo. Consiguiendo de esta manera un mínimo contacto para una mejor rotación del par.

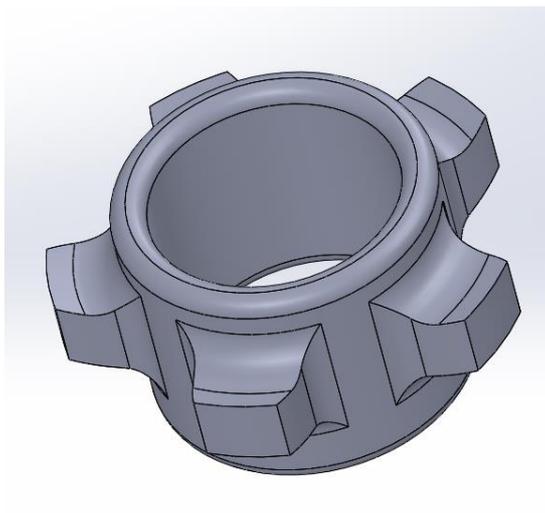


Figura 3-63. Camisa de rotación.

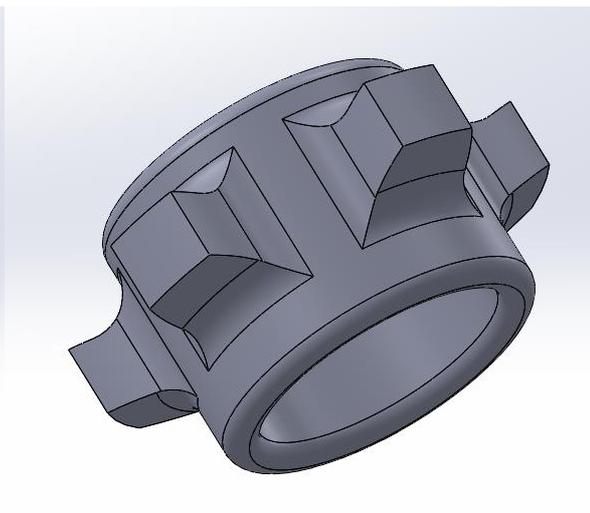


Figura 3-64. Camisa de rotación (detalle).

- Camisa de rotación. (Peso 3g x 1 Pieza). Figuras 3-63 y 3-64.

Esta peculiar pieza reúne las varillas de la esfera protectora entorno a un punto, para servir de contacto esfera-giroscopio soportando la carga que se distribuye entre ambos. Está diseñada con forma de camisa cilíndrica o cilindro hueco con unos salientes por los laterales del mismo a media altura de la pieza, dichos salientes con objeto de servir de anclaje a 5 varillas de unión con los vértices de uno de los pentágonos del icosaedro truncado (esfera protectora). Las pestañas de saliente adoptan una inclinación de 15° calculados para formar una pirámide pentagonal que se distancie al menos 2 cm del diábolo para que tenga cierta holgura de juego para paliar posibles bloqueos del mecanismo en las colisiones.

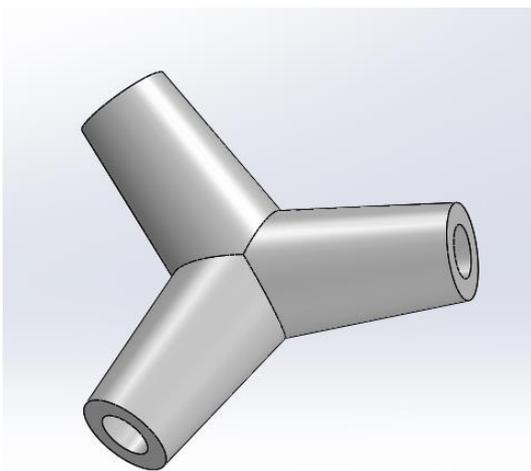


Figura 3-65. Unión simple.

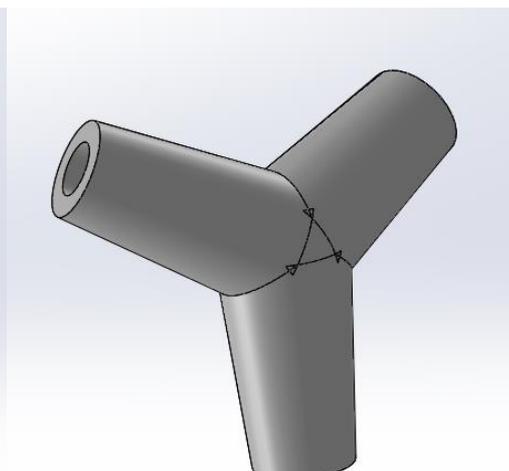


Figura 3-66. Unión simple (detalle).

- Unión simple. (Peso 0.3g x 50 Piezas). Figuras 3-65 y 3-66.

La función fundamental de esta pieza es la de conectar las varillas que conformarán el icosaedro truncado para conseguir los vértices de la estructura, aportando la rigidez de las

varillas a la estructura de manera conjunta. Esta pieza es básica para el ensamblado de la protección del multirroto, cuya geometría debe adaptarse a los parámetros que definen la figura del icosaedro truncado, puesto que estos vértices serán los que unan y direccionen las barras para su unión. Se asemeja a un puzle donde sus piezas deben encajar, una desviación en la pieza para los 50 vértices necesarios de esta tipología podría suponer una estructura inconexa, imposible de ensamblar. La forma que adopta esta pieza para ser vértice, es la de un pequeño anillo donde confluyen 3 brazos o patas, por los que se proporciona el agarre para las varillas y transmiten los esfuerzos de la estructura. La geometría circunferencial de la zona de unión de las patas se debe a la mejor repartición de los esfuerzos sobre la misma, apoyando cada pata en un arco conectado a las otras dos, de esta manera se evita el apoyo puntual en un centro de conexión donde los esfuerzos se concentran y maximizan. Las 3 patas forman planos entre ellas, planos que compondrán las caras del icosaedro truncado. Cada pieza tiene 3 planos, dos de ellos formarán caras hexagonales y el otro plano una cara pentagonal, formando ángulos entre aristas de 108° para las aristas que comprenden el pentágono y de 120° para las aristas que componen el hexágono. Dichos brazos se fabrican con una perforación incluida longitudinalmente en ellos, pero no pasante, de un diámetro de 2 mm.

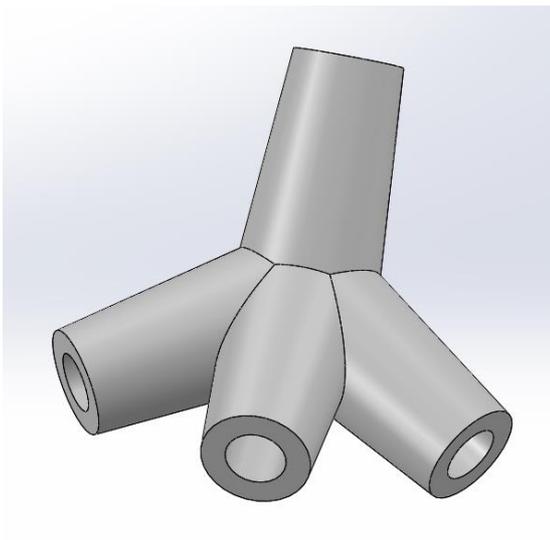


Figura 3-67. Unión especial.

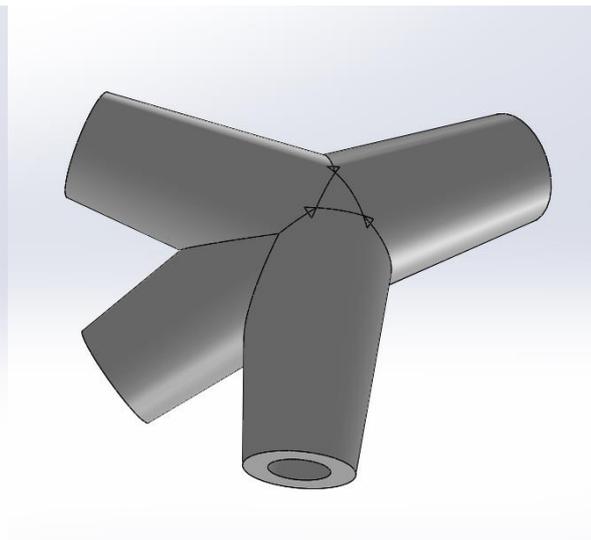


Figura 3-68. Unión especial (detalle).

- Unión especial. (Peso 0.4g x 10 Piezas). Figuras 3-67 y 3-68.

Al igual que en el caso anterior estos vértices sirven para conectar varillas y hacer las veces de vértices, pero poseen una característica especial, un cuarto brazo para el agarre de los vértices al giroscopio. La geometría base sobre la que se implementa el 4º brazo es la misma que en el caso anterior, esta vez en el arco que une los dos brazos que constituyen la cara pentagonal se añade un cuarto brazo, cuya dirección forma un ángulo de 15° con la cara pentagonal y además, vista dicha cara en planta, llevaría la dirección de la bisectriz del ángulo interior del pentágono. Con lo que este nuevo brazo formaría en los 5 vértices del pentágono base una pirámide pentagonal, cuya altura sería la separación del diábolo de rotación a la cara pentagonal para evitar interferencias. Serían necesarias 10 de estas piezas, 5 por cada pentágono que conecta con el par rotación del anillo exterior del giroscopio.

3.6 Mapa de ensamblado de las piezas

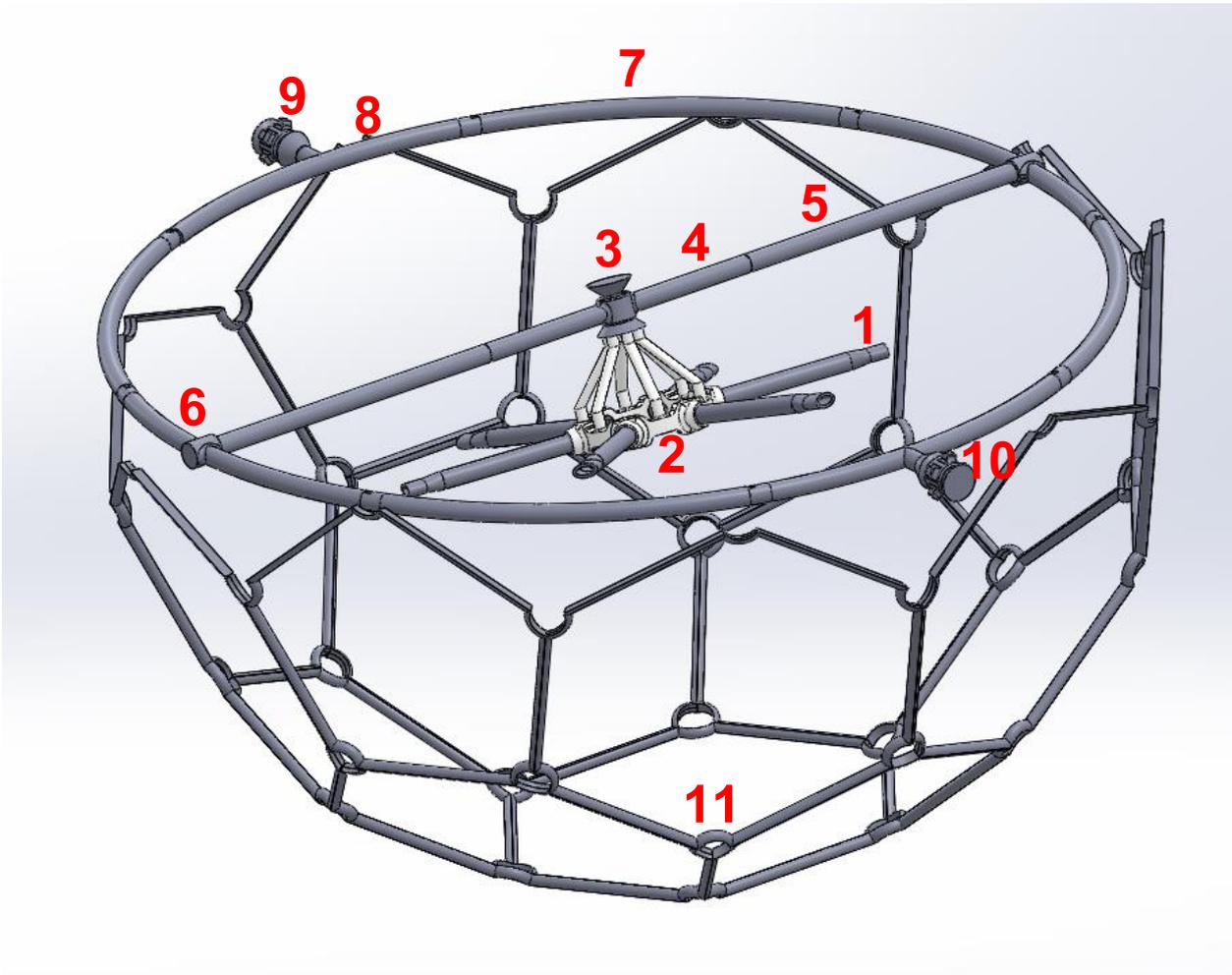


Figura 3-69. Mapa de ensamblado de piezas.

1. Brazo del rotor.
2. Cuerpo.
3. Diábolo de rotación interior.
4. Tramo interior viga.
5. Tramo exterior viga.
6. Tramo anillo interior.
7. Tramo anillo simple.
8. Tramo anillo exterior.
9. Camisa de rotación.
10. Diábolo de rotación exterior.
11. Esfera protectora de varillas y vértices. (Para el ensamblado a ordenador se usa modelo de parcheado expuesto anteriormente en “opciones y desarrollo”).

3.7 Método de acceso de señal

En este apartado se va a abordar el parámetro de diseño de acceso de la señal, es preciso mencionar cual va a ser la forma de atajar dicho problema en este documento, puesto que es claro que la señales rara vez atraviesan la tierra.

Para este prototipo en cuestión, la señal empleada va a ser una señal de 2.4 GHz, que es la frecuencia usada por las señales wifi. Para el control de aparatos de este tipo es frecuente encontrar esta banda de señal, puesto que estas señales llevan un identificador con ellas, es decir, que la transmisión de datos entre radio y emisora lleva una etiqueta que tanto el aparato como el control son capaces de interpretar. La principal ventaja del reconocimiento de señal es que se palian en gran medidas las interferencias que se puedan producir, debido a que si se recibe mas de una señal esta frecuencia, el aparato es capaz de interpretar sólo la que lleva su etiqueta, pudiendo así ignorar las demás.

Una vez aclarado el tipo de señal empleada, pasamos a hablar del alcance de la misma, que en las mejores condiciones en campo abierto es de unos 60 o 70 metros para el equipo empleado para este prototipo, puesto que se ha empleado una emisora de bajo coste con escasa potencia. Fuera aparte de la distancia, el objetivo es transmitir la señal en línea recta dentro de las conducciones. Como podemos apreciar en la *Figura 3-70*, donde tenemos un croquis del operario trabajando con el aparato en las conducciones y pozos, la forma de conseguir una señal clara dentro de la conducción pasa por encerrar cada tramo de inspección con dos puntos de acceso a través de pozos contiguos.

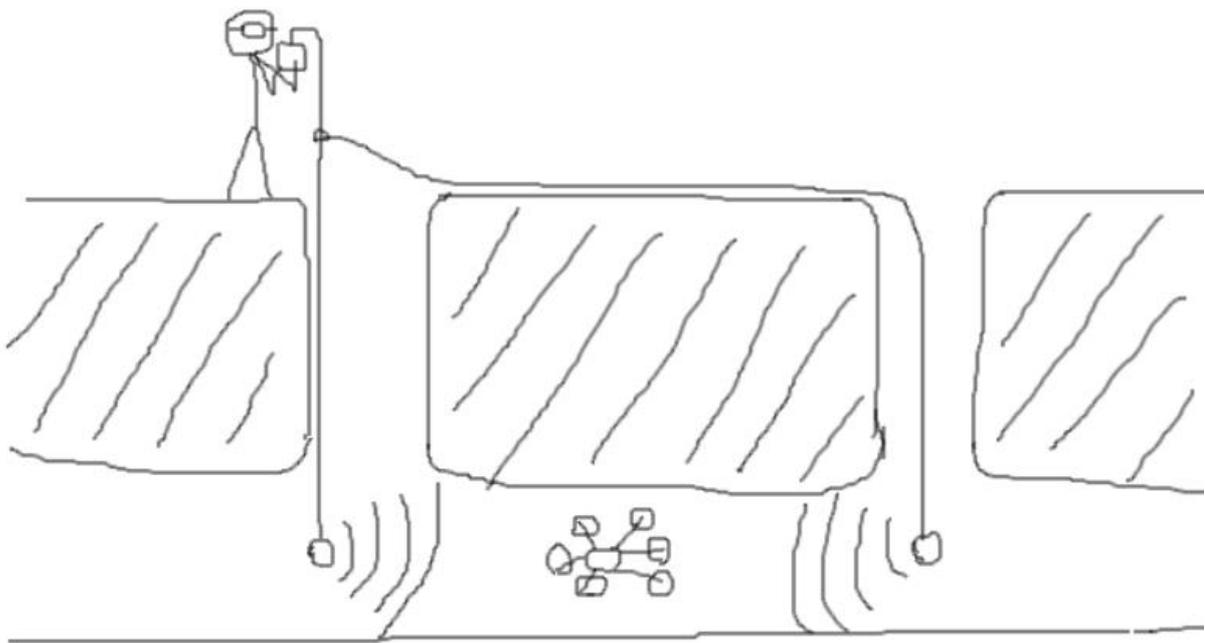


Figura 3-70. Croquis de acceso de señal.

El sistema consiste básicamente en descolgar cables de antena del control del aparato por pozos contiguos, para que haya dos puntos de acceso de la señal, tanto al principio como al final de la conducción. De esta manera además de acceder a la señal, teniendo controlados ambos pozos es más fácil trabajar con el aparato, tanto por la iluminación natural o artificial que se pueda introducir en las conducciones como por la señal accesible en todo el tramo.

Para el desarrollo del proyecto ésta va a ser la metodología de trabajo por el momento, a la espera de en futuras iteraciones mejorar la potencia de la señal y la forma del acceso de la misma.

4 FABRICACIÓN Y MONTAJE

4.1 Fabricación

En este apartado de fabricación se va a tratar el proceso completo para convertir los modelos por ordenador en una realidad. En esta fase del proyecto, se va a exponer las limitaciones en la fabricación y se va a explicar el proceso en un orden lógico.

Después de aclarar el proceso, se va a entrar en detalle para cada una de las piezas las consideraciones en la fabricación, además de exponer tanto los problemas generales de este tipo de fabricación aditiva como los surgidos en este proyecto durante el proceso de fabricación.

Comenzando por definir los recursos y el proceso de fabricación, se hablará en primer lugar de la impresora y la tecnología empleada por esta para la fabricación aditiva.

La tecnología de fabricación que se emplea en este proyecto es conocida como FDM proveniente de sus siglas en inglés Fuse Deposition Modeling (Modelado por deposición fundida). Tecnología simple de uso cotidiano en hogares o pequeñas industrias, puesto que para las necesidades de prototipado es la tecnología más accesible. Esta es una tecnología muy flexible, y es capaz de realizar piezas muy diversas, aunque existen algunas restricciones sobre las características de lo que se puede fabricar con esta técnica, especialmente en lo referente a la pendiente de los voladizos, que se ha tenido en cuenta en el proceso de modelado. Comenzando por un proceso de software, que parte de un fichero (.stl), donde la pieza es orientada para poder ser impresa, y dividida en capas se calculan las trayectorias que la boquilla deberá seguir para depositar el material, capa a capa, para conformar la pieza. Si son necesarias, se pueden generar estructuras de soporte.

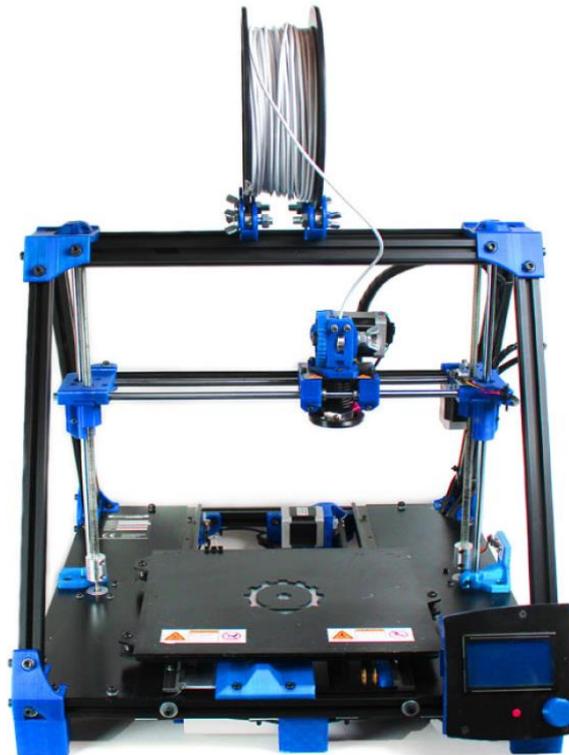


Figura 4-1. Impresora BCN3D+ utilizada (modelo Mendel).

La impresora (*Figura 4-1*) de la que se dispone es un modelo con un control numérico de 3 ejes de traslación con unas dimensiones de fabricación de 252x200x200 mm (Anchura, profundidad y altura). Se ha usado una impresora autorreplicable de código abierto RepRap, la cual esta ensamblada como un prisma triangular tumbado, cuyos ejes móviles son: las torretas de tornillo sin fin para el movimiento en el eje vertical Z, movimiento de la base en un eje horizontal Y y el movimiento de la boca de extrusión en otro eje horizontal X. Mediante motores eléctricos se aporta movimiento circular que se transforma en lineal mediante los tornillos sin fin o bien mediante poleas con correas.

Las limitaciones en la fabricación vienen dadas por dos importantes parámetros, que son las dimensiones del área de fabricación de la impresora y el grosor de la boquilla de extrusión del material. En un segundo plano podemos encontrar limitantes en la calidad de la fabricación como pueden ser los controles de temperatura de la cama y del extrusor, los pasos de los motores eléctricos, el rendimiento de los sistemas mecánicos como las poleas y engranajes, y en una menor medida la capacidad de procesamiento de la máquina que rara vez suele ser limitante en el proceso de fabricación.

Con lo cual para el proyecto en cuestión se han diseñado piezas que estén dentro de los márgenes dimensionales de 252x200x200 mm, además de adaptar los parámetros del control de la fabricación a unos valores que nos permiten un acabado considerablemente bueno para las necesidades del prototipo.

El proceso de fabricación a rasgos generales podemos dividirlo en 3 etapas, la primera de ellas consistente en el modelado por ordenador ya ha sido tratada en este documento, la segunda es el procesado de modelos para su impresión mediante un software de traducción a órdenes control numérico (G-code), y la última de ellas es la impresión en la máquina.

En la segunda fase donde se emplea un software de traducción, se recibe un fichero (.stl) y se genera un fichero texto (.txt) con órdenes de código G de control numérico que es leído por la máquina. El software empleado en este proyecto es el CURA de Ultimaker (*Figura 4-2*), donde se carga la pieza de forma visual en un área delimitada de impresión emulando el sistema real, para poder orientarla sobre la base de impresión en el mismo programa. Además de posicionar, el programa te permite multiplicar o unir piezas, además que te permite cambiar los parámetros de la impresión (*Figura 4-3*) como la velocidad, la temperatura de extrusión, los espesores de capa, las mallas de relleno... para poder implementar todos los parámetros de impresión en el código que este genera.

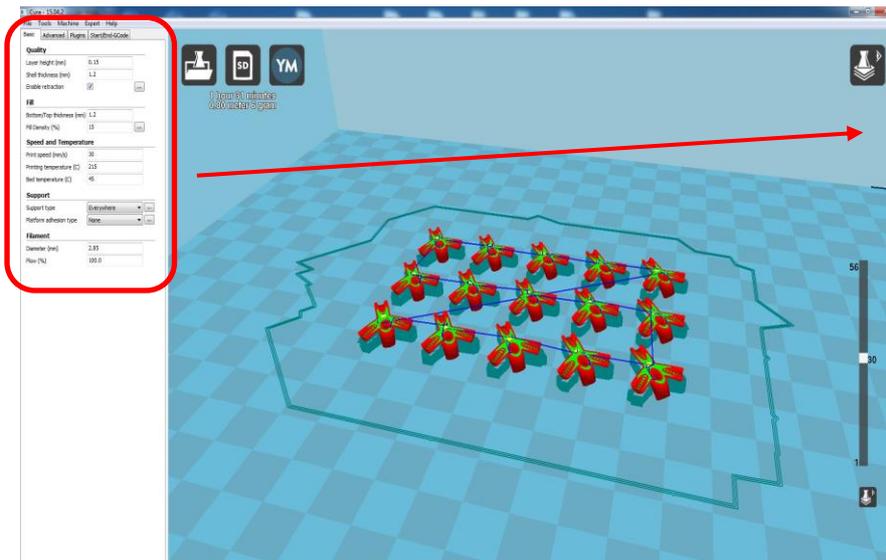


Figura 4-2. Pantalla programa Cura.

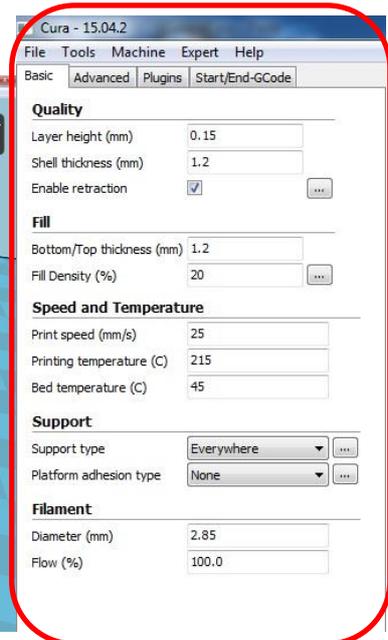


Figura 4-3. Detalle parámetros Cura.

El mismo programa según el grosor de extrusión y las trayectorias de impresión, calcula según el material los pesos de la pieza y los tiempos de la fabricación.

Una vez cargados los datos en un fichero de texto generado por el programa, se carga éste en una tarjeta SD de almacenamiento que se conecta a la máquina para la lectura de las órdenes.

En la tercera fase de impresión cabe destacar la puesta en marcha de la máquina con los pasos a realizar para su funcionamiento, pasos que vamos a explicar a continuación:

1. Enchufado y encendido. Lo primero consiste en conectar la máquina a la red eléctrica doméstica de 220V y a continuación poner el interruptor trasero de la máquina en la posición de encendido. De esta manera se conectará la pantalla LCD y comenzará a funcionar la ventilación.
2. Conectar la tarjeta SD. En la parte trasera del cuadro de mandos se introduce la tarjeta SD con el archivo de órdenes de nuestra pieza en código G, con lo que la máquina refrescará la pantalla automáticamente para su lectura.
3. Calentamiento (Preheat). En el menú de la máquina debemos seleccionar la opción de precalentamiento tanto para el extrusor como para la base de impresión. Las temperaturas de preheat vienen están configuradas según el material, por lo que se selecciona el material de impresión y ello conlleva unas temperaturas fijadas. Para nuestro caso, el PLA, las temperaturas de impresión son de 45°C para la cama de impresión y de 215°C para la boquilla del extrusor.
4. Introducción del material de extrusión. Una vez calentada la boquilla de extrusión, debemos introducir el filamento de material por la boca de extrusión. Para ello, debemos irnos a la opción de control manual de los ejes en el menú donde nos permite controlar la extrusión, de este modo introducimos el filamento al mismo tiempo que ordenamos la extrusión, puesto que la rueda de extrusión se mueve en vacío y cuando introducimos el material, ésta lo agarra y lo empuja de manera autónoma para controlar la extrusión en el proceso.
5. Preparado de la cama de impresión. La impresión se realiza sobre una placa de vidrio donde es fácil eliminar los residuos después de la impresión además de la facilidad de quitar o poner sobre la base de la máquina dicha placa gracias a unas pinzas. Para completar el último paso

antes de la impresión es necesario dotar a esta placa de vidrio de un recubrimiento pegajoso para evitar el deslizamiento de las capas de plástico sobre el cristal, para ello se emplea una laca especial para rociar la base, aunque también es posible emplear laca comercial de peluquería, con la cual se consigue el mismo efecto. Debido a ello, al acabar las impresiones es necesario rascar la base para despegar las figuras impresas.

6. Comenzar la impresión. Una vez está todo listo, solo es necesario ordenar la impresión desde el archivo de la SD en el menú de la máquina, con lo cual la máquina comienza a interpretar las órdenes de control numérico. Sólo cabe destacar que la máquina posee un botón rojo para interrumpir el proceso en cualquier momento, que se usa cuando se detectan defectos en la fabricación que vuelve nuestra pieza inservible.

Después de explicar la tecnología y el proceso en términos generales, se procede a continuación a parametrizar la impresión de cada una de las piezas consideradas para este proyecto, exponiendo sus parámetros y orientación en la impresión. (*Figuras 4-4 hasta 4-17*).

Como parámetros generales de impresión para todas las piezas se han usado:

- Temperaturas PLA: 215°C para boquilla del extrusor y 45°C para la cama de impresión.
- Velocidades de impresión: comprendidas entre 25 y 35 mm/seg dependiendo de las necesidades de precisión requerida para la pieza.
- Grosor de pared/capa: 0.8 mm para las piezas esbeltas de la viga interior y el anillo del giroscopio, y 1.2 mm para el resto de las piezas.
- Densidad de infill: Comprendidos entre 15 y 20 % dependiendo de la visualización de la malla interior y de los pesos de la pieza.

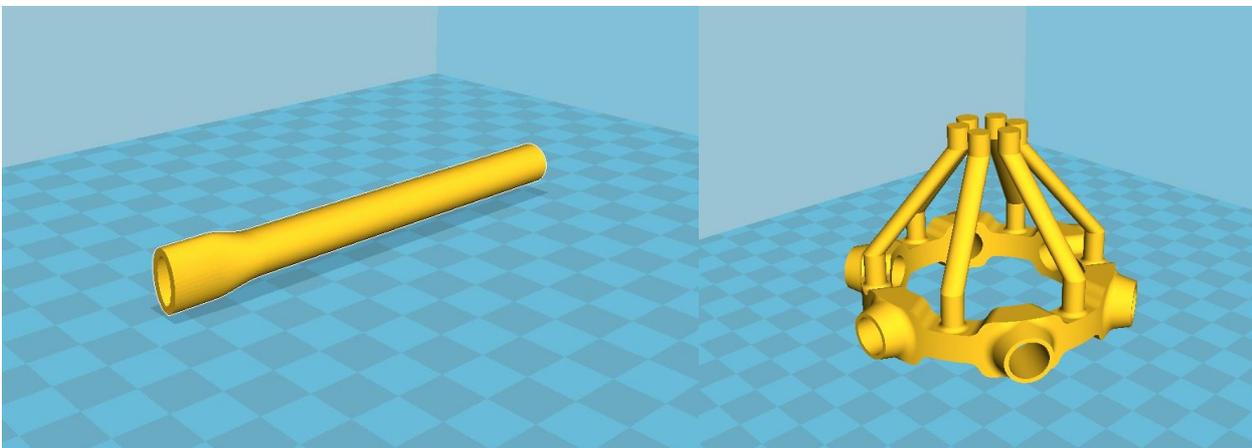


Figura 4-4. Postura impr. del brazo.

Figura 4-5. Postura impr. del cuerpo.

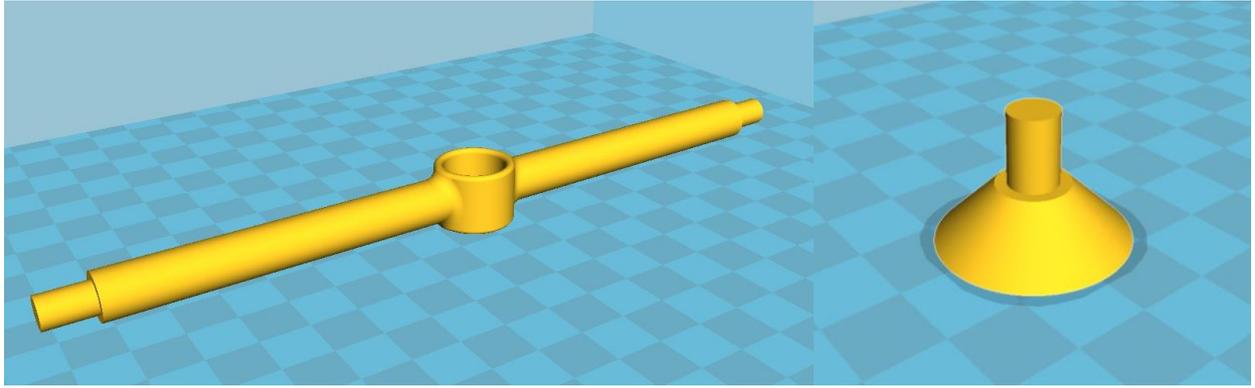


Figura 4-6. Postura impr. del tramo central viga.

Figura 4-7. Postura impr. del pivote macho.

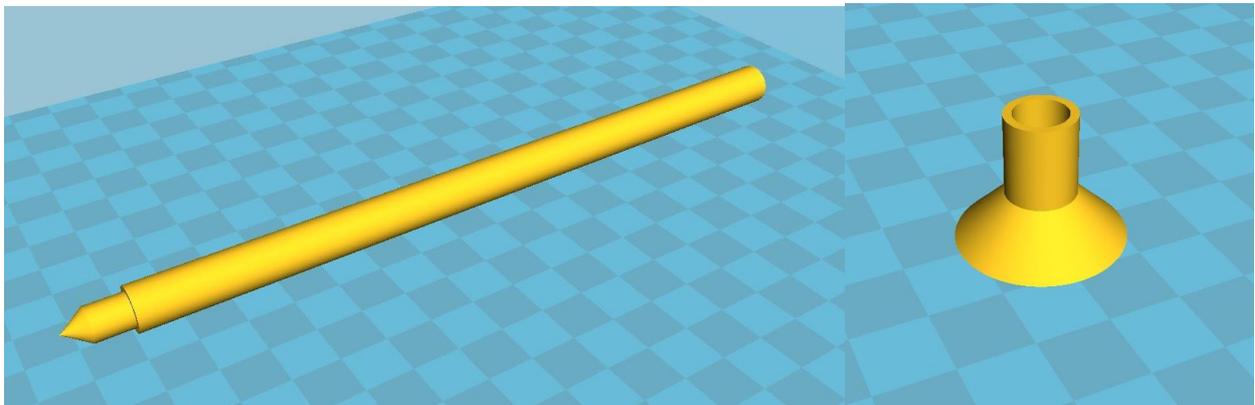


Figura 4-8. Postura impr. del tramo exterior viga.

Figura 4-9. Postura impr. del pivote hembra.

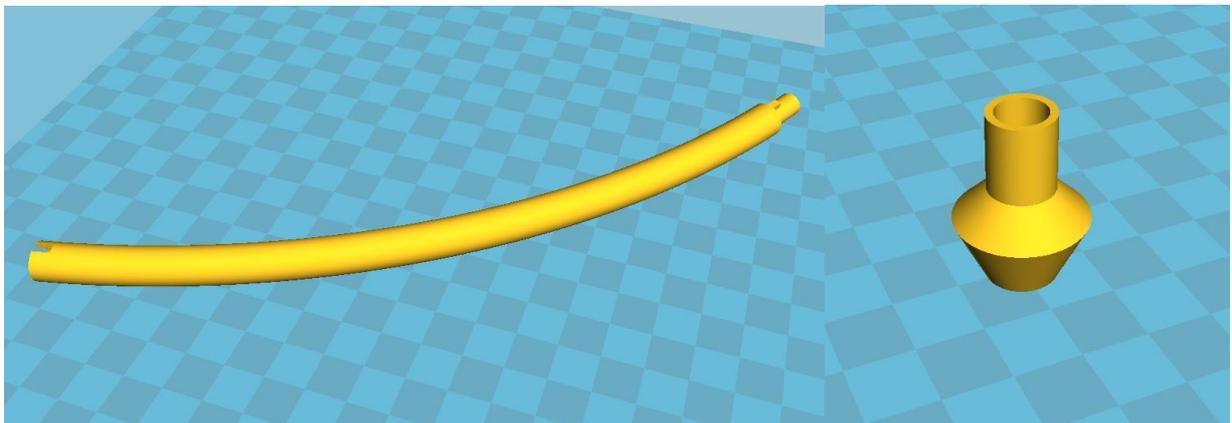


Figura 4-10. Postura impr. del tramo anillo simple.

Figura 4-11. Postura impr. del diábolo hembra.

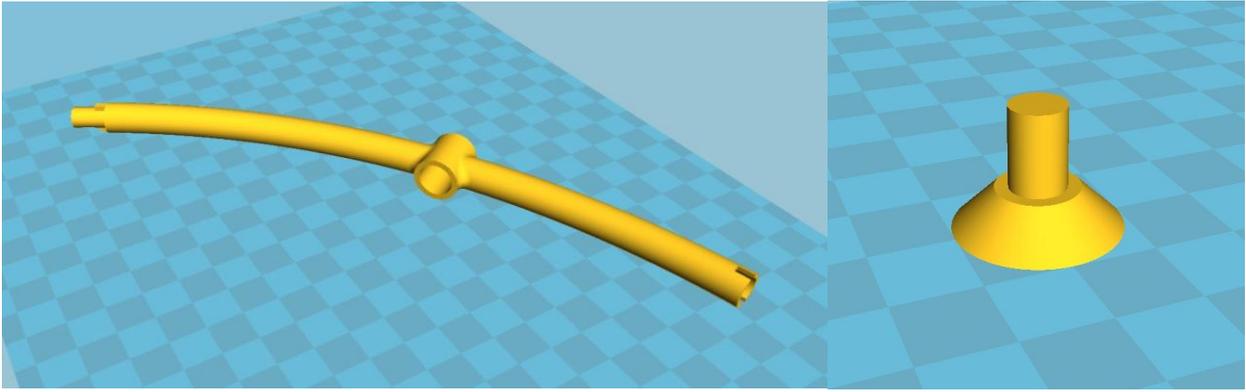


Figura 4-12. Postura impr. del tramo anillo interior. Figura 4-13. Postura impr. del diábolo macho.

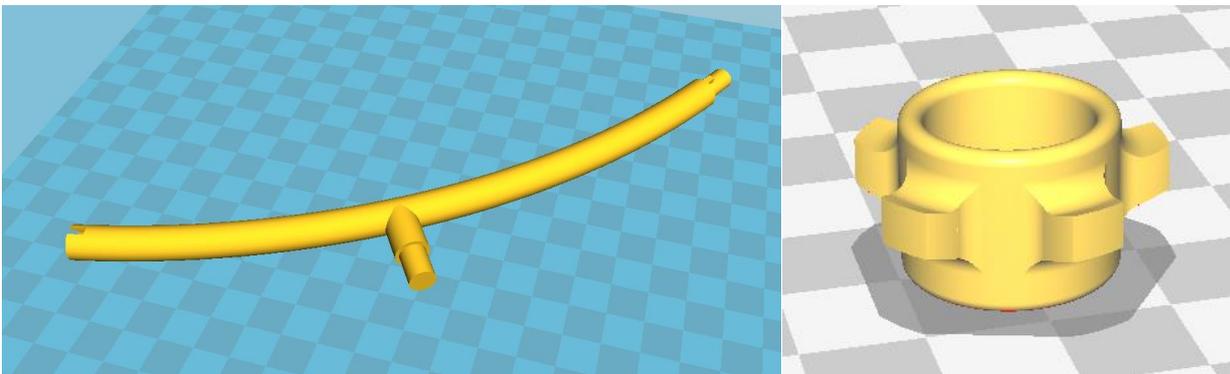


Figura 4-14. Postura impr. tramo anillo exterior. Figura 4-15. Postura impr. camisa de rotación.

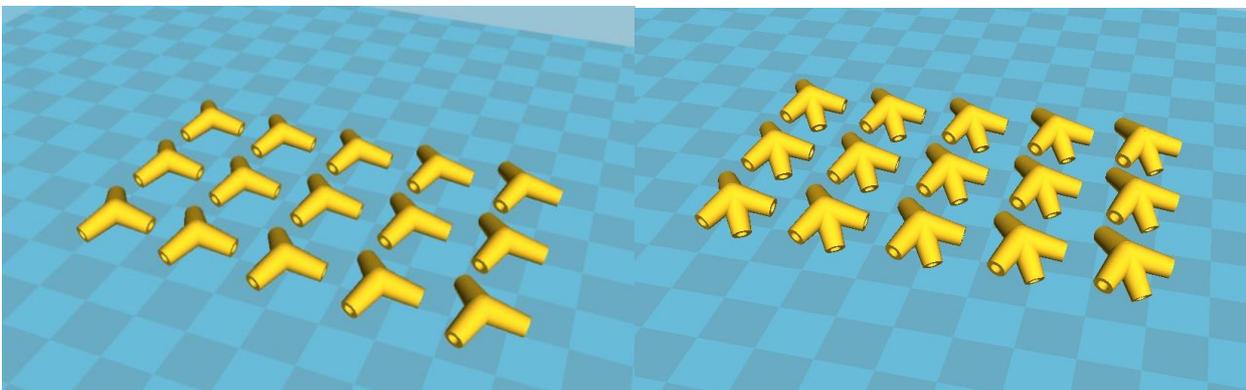


Figura 4-16. Postura impr. unión simple.

Figura 4-17. Postura impr. unión especial.

4.2 Problemas en la fabricación

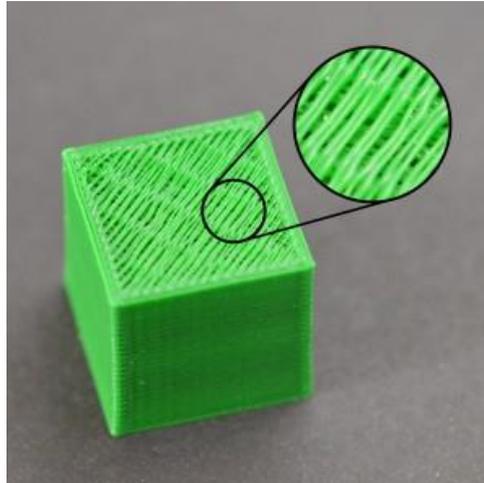


Figura 4-18. Huecos en cara superior.

- Huecos en la cara superior de las impresiones (agujeros o espacios en la cara superior de la pieza). (*Figura 4-18*). Esto es debido a tener pocas capas en la parte superior de la pieza o un porcentaje de relleno demasiado bajo para el infill de la pieza. La manera de solucionarlo es aumentando el número de capas en la parte superior de la pieza o bien aumentando el porcentaje de relleno de infill de la misma (a partir de 15% no debería haber problemas. Si el problema persiste es síntoma de la escasa extrusión del filamento).



Figura 4-19. Hilos sobrantes en las capas.

- Piezas impresas con “hilos” (el cabezal deja restos de hilos de plástico en sentido horizontal). (*Figura 4-19*). Este problema que aparece de manera más frecuente es debido a la débil retracción del filamento durante la impresión o a la velocidad inadecuada de esta retracción, que puede formar burbujas en la boquilla o bien morder el filamento. Otro de los principales causantes del problema es la excesiva temperatura de extrusión que provoca que el material se vuelva más viscoso produciéndose su vertido aunque no se extruya. La solución a este problema pasa por modificar los parámetros de retracción como la velocidad o disminuyendo

la temperatura de extrusión a una más adecuada, también existe la opción de decir al programa que evite cruzar espacios abiertos sin extruir durante la impresión y así se formarán menos hilos.



Figura 4-20. Deformaciones por sobrecalentamiento.

- Sobrecalentamiento (impresiones que en los pequeños detalles llegan a sobrecalentarse y a deformarse). (Figura 4-20). Este problema también frecuente en la impresión puede ser debido a la escasa o nula refrigeración durante la misma, debido a la elevada temperatura de impresión o debido a impresiones demasiado rápidas. La forma de solucionar este problema es habilitar o mejorar la refrigeración, o disminuir la temperatura o velocidad de impresión, aunque una solución bastante utilizada es imprimir varias piezas a la vez, de esta forma da tiempo suficiente a que se enfríe cada capa.



Figura 4-21. Deslizamiento de capas

- Desplazamiento de capas (durante la impresión se desplaza una capa en alguno de los ejes X, Y). (Figura 4-21). Este problema puede ser debido a dos factores, los desplazamientos rápidos sin extrusión pueden provocar que un motor pierda o se salte pasos, o bien por un exceso o defecto de tensión en las correas como problema mecánico o un problema electrónico en los controladores de los motores que mandan los mA de manera errónea. La forma de solucionar estos problemas es mediante el uso de un polímetro para detectar fallos

en los controladores, reduciendo la velocidad de los motores cuando no se extruye o haciendo un buen ajuste mecánico de correas.



Figura 4-22. Obstrucción de boquilla de extrusión.

- Extrusor obstruido (no sale plástico por la boquilla). (*Figura 4-22*). Este problema aunque menos frecuente, se ha producido durante la realización del Proyecto, y es debido a una temperatura de extrusión escasa o un atasco por impurezas del filamento. Se podría solucionar evaluando el correcto funcionamiento del sensor de temperatura del extrusor, o la solución que se ha empleado y la más habitual es desmontando el extrusor para desatascarlo manualmente.



Figura 4-23. Borriones de plástico.

- Borriones de plástico en la pieza (pequeñas manchas de plástico en la superficie de la pieza). (*Figura 4-23*). Este problema es exactamente el mismo que el problema de los hilos anteriormente mencionado pero de mayor magnitud, puesto que la pérdida de material por mala retracción o temperatura excesiva es más acentuada. La solución es similar que la del caso anterior.



Figura 4-24. Warping.

- “Warping” la pieza se despegaba de la base (en las esquinas se tiende a curvarse y deformarse después de que se han impreso). (*Figura 4-24*). Este problema se da debido a que no se usa o se usa de manera escasa una laca de fijación para la impresión que se emplea en la cama caliente, o bien debido a que las posibles Corrientes de aire existentes enfrían rápidamente la pieza por los extremos. La solución pasa por emplear más laca y proteger la máquina frente a posibles corrientes de aire.

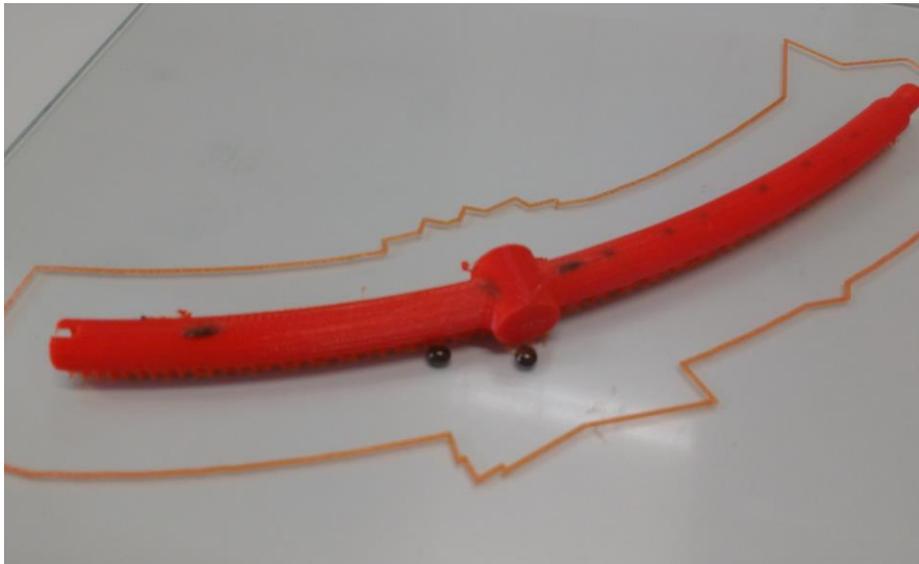


Figura 4-25. Goteo de plástico quemado.

- Exceso de plástico en forma de gota (durante la impresión observamos plástico en forma de gotas). (*Figura 4-25*). Este problema que es poco frecuente también ha aparecido en el desarrollo del prototipo, se produce debido a que la varilla y la boquilla no están bien roscadas, y al estar sueltas se filtra material por la zona de roscado que acaba goteando. La solución es sencilla, apretar el roscado de la varilla y la boquilla.

4.3 Montaje

En esta sección del documento se va a entrar en detalle del ensamblado real de las piezas para la construcción completa del prototipo final. Se explicará paso a paso las etapas del montaje explicado los tipos de uniones y materiales empleados en ella que dan consistencia al conjunto.

Lo primero para el montaje del aparato es la preparación de las piezas que lo conforman, que las diferenciaremos en dos clases, las piezas creadas por impresión en plástico y las piezas compradas directamente. Estas últimas que han sido compradas no requieren preparación alguna, a pesar de que durante el ensamblaje necesiten de material adicional de adaptación o de unión.

La preparación de las piezas impresas no es más que la retirada de materiales de soporte y materiales sobrantes, además de la corrección de las imperfecciones de la fabricación. Para este trabajo de eliminación de material plástico se ha empleado una taladradora dremel multiherramienta, que con sus distintos cabezales de distintas geometrías nos ofrece múltiples opciones para la rectificación de las piezas.

En los brazos de los rotores (*Figura 4-26*) es necesario eliminar el material de soporte interior, soporte necesario para la creación de las capas superiores de bóveda dentro del tubo, dicho material ha sido retirado rascando el interior con un destornillador plano, puesto que al tratarse de un esbelto tubo los cabezales de la dremel no tienen suficiente profundidad. También ha sido necesario la retirada de soporte de la parte exterior del tubo que ha servido de cama para la impresión.

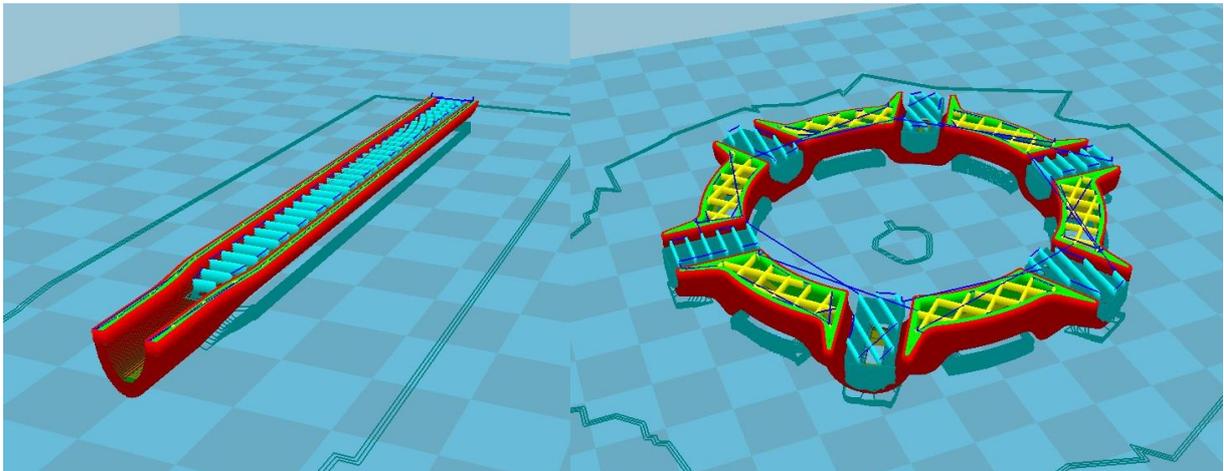


Figura 4-26. Corte impr. del brazo.

Figura 4-27. Corte impr. del cuerpo.

En la parte central del multirroto, el cuerpo (*Figura 4-27*), solo ha sido necesario retirar material de soporte de los agujeros para poder encajar los brazos en él y de esta manera poder pasar los cables desde los rotores en los extremos de los brazos hasta la zona interior del cuerpo donde se aloja la parte de procesamiento del aparato. Además de la retirada de material de soporte de la base del cuerpo que tiene una superficie de apoyo intermitente en su circunferencia.

Para la parte inferior del diábolo (*Figura 4-28*) que se une al cuerpo del multirroto solo ha sido necesario rectificar con la dremel unas pequeñas cavidades en su base para el encaje con el cuerpo del mismo. Mientras que en la parte superior del diábolo no ha sido necesaria ninguna rectificación.

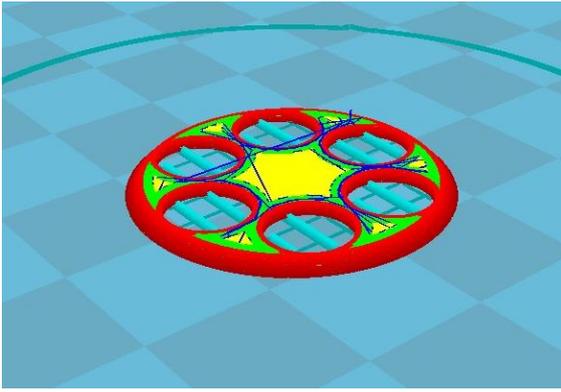


Figura 4-28. Corte impr. de pivote macho.

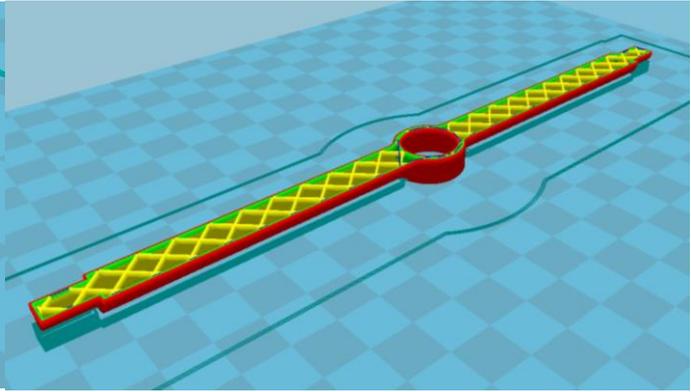


Figura 4-29. Corte de impr. de tramo central viga.

En la viga recta interior del giroscopio, en el tramo central (Figura 4-29), solo ha sido necesario rectificar los soportes exteriores al tubo puesto que en la postura de impresión existe un escalón entre la camisa donde gira el diábolo y el tubo en si mismo. Mientras que en los tramos de los extremos de la viga (Figura 4-30) además de retirar un pequeño soporte exterior al tubo en sus extremos en punta, también ha sido necesario rectificar con la dremel las cavidades hembra para la inserción de los encajes macho del tramo central.

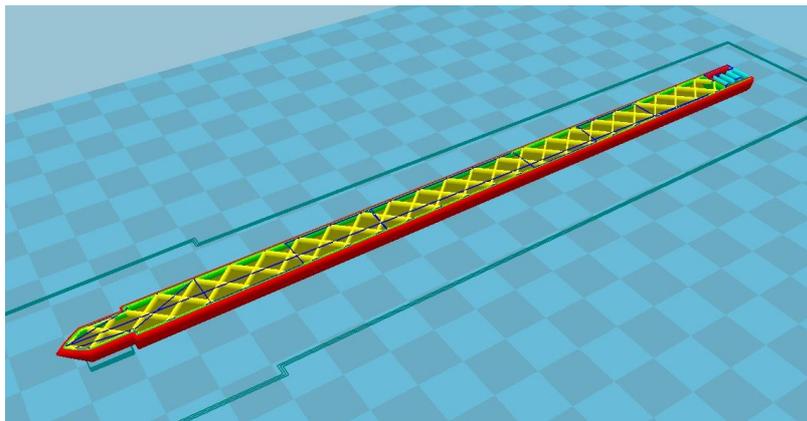


Figura 4-30. Corte impr. del tramo exterior viga.

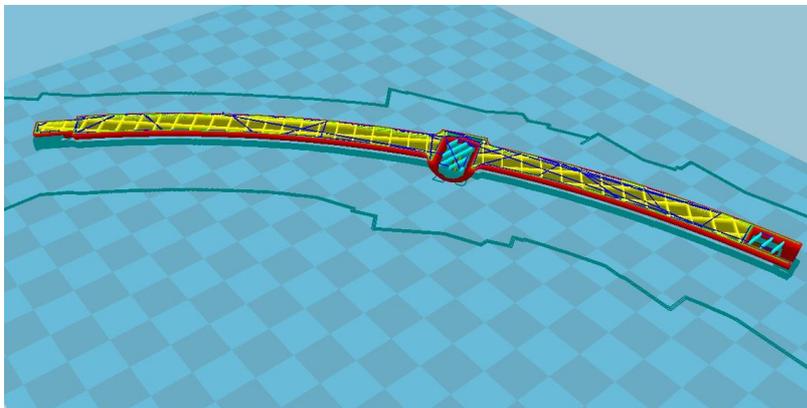


Figura 4-31. Corte de impr. del tramo de anillo simple.

En los tramos curvos del anillo exterior del giroscopio (*Figura 4-31*) ha sido necesario retirar con la ayuda de la dremel el material de soporte de las cavidades hembra para las uniones. Además, en el tramo curvo de soporte interior a la viga, ha sido necesario reparar también la cavidad hembra con la dremel para el ensamblaje del par rotación con las puntas macho de la viga central en sus extremos.

Para el enganche hembra (*Figura 4-32*), que forma parte del diábolo exterior del par rotación entre la esfera y el giroscopio, ha sido necesario reparar la cavidad interior que encaja con el tramo curvo del giroscopio porque debido a su postura de impresión ha necesitado soporte. Mientras que en la parte macho de este diábolo no ha sido necesaria ninguna rectificación.

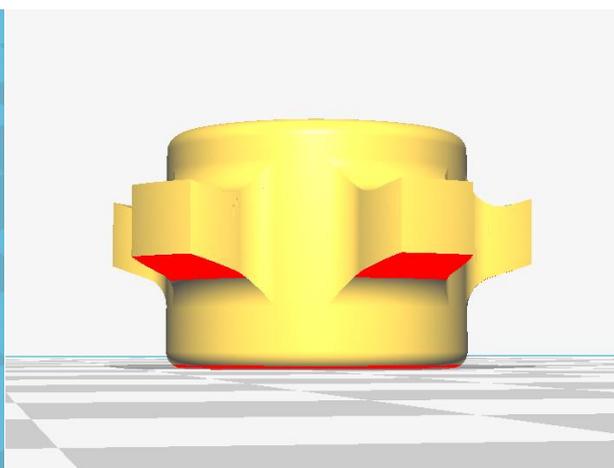
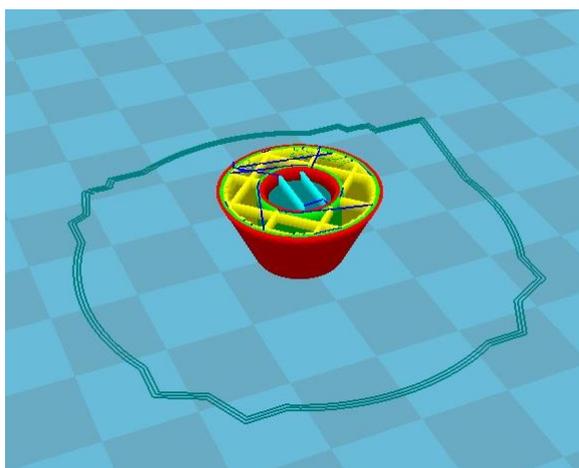


Figura 4-32. Corte de impr. diábolo hembra.

Figura 4-33. Soportes de impr. camisa de rotación.

En las camisas con los pulpos de unión para la esfera (*Figura 4-33*), ha sido necesario la retirada del material de soporte de debajo de los brazos del pulpo. Mientras que para las uniones que conforman los vértices de la esfera de protección no ha sido necesario ninguna preparación para el ensamblado posterior.

Una vez preparadas todas las piezas y rectificadas todos los sobrantes es el momento de proceder al montaje del aparato. Cabe destacar que los adhesivos usados en el montaje son del tipo *cianoacrilato*, lo que comunmente se denomina como *super glue* o supercementos. El montaje se procede a explicar en un orden lógico comenzando desde dentro hacia afuera:

1. Unión de los brazos al cuerpo.

Para la union de los brazos al cuerpo se ha utilizado cinta de teflon para fontanería, de esta manera se engrosa las extremidades de unión de los brazos enrollando el teflón para posteriormente introducirlo haciendo presión en los orificios (*Figura 4-34*). De esta manera queda fuertemente unido, además de la posibilidad de untar adhesivo en las uniones para reforzarlo de forma permanente.

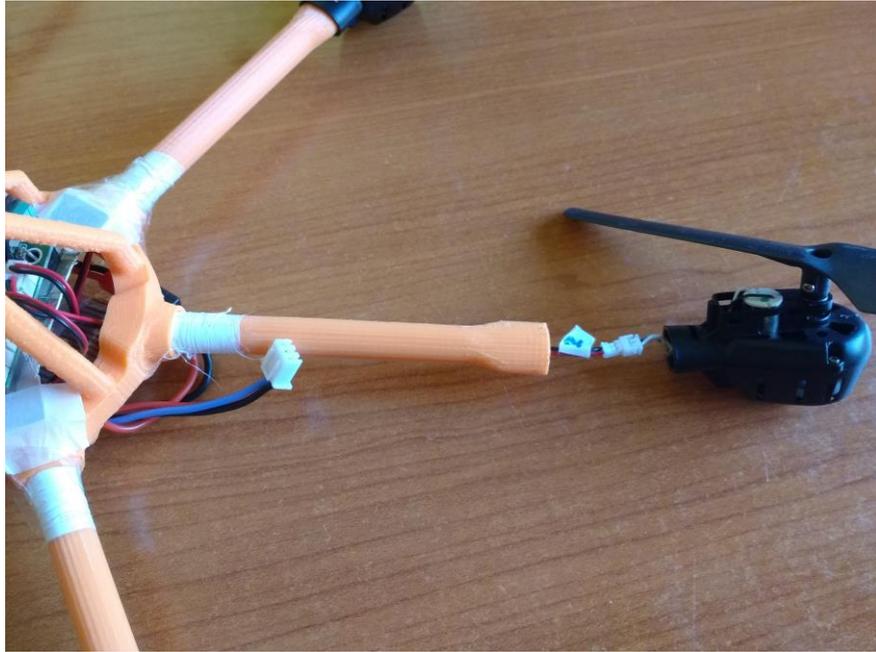


Figura 4-34. Ensamble de brazos y rotores.



Figura 4-35. Unión del diábolo al cuerpo.

2. Unión del pivote macho del diábolo al cuerpo.

En esta etapa se une los tirantes superiores del cuerpo que acaban reunidos entorno a una geometría circular, con la parte inferior del pivote macho, en los orificios preparados para ello (*Figura 4-35*). Esta unión se realiza con abundancia de adhesivo para que quede fuertemente unida.

3. Montaje del cableado e implementación de los rotores.

Los brazos vienen preparados con la geometría elipsoidal para el encaje de las jaulas de los motores, este ajuste se da a presión y no es necesario ningún material adicional (*Figura 4-34*). Previo a la inserción de los motores, se pasa el cableado por el interior de los tubos para reunirlos en el centro del cuerpo, donde se conectará al procesador. En esta etapa no se usan

adhesivos.

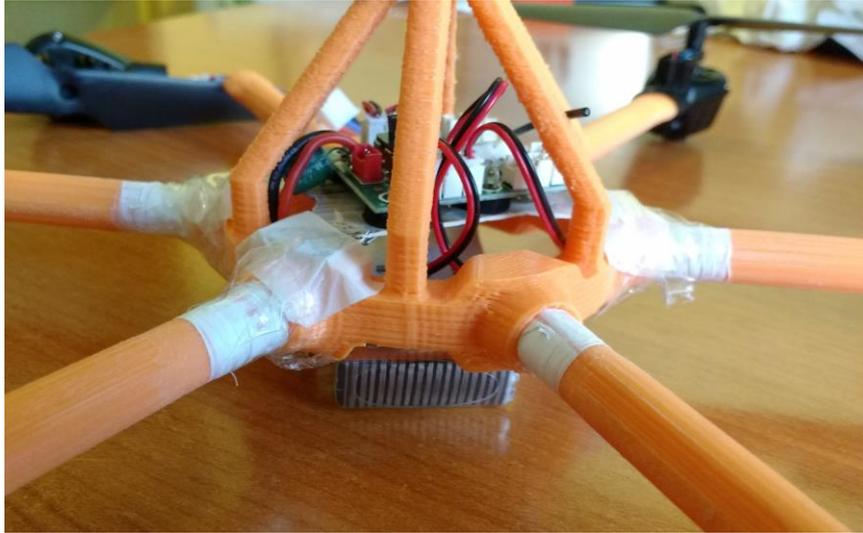


Figura 4-36. Soportes de procesador y batería.

4. Montaje del procesador y soportes para la batería.

Para montar el procesador y la batería en el interior del cuerpo del aparato, es necesario crear unos soportes a partir de unas tarjetas de plástico que son recortadas para su ajuste (*Figura 4-36*). Dichas tarjetas sirven de cama para ambos elementos, las cuales se enganchan con alambre maleable y fino para no añadir peso.



Figura 4-37. Conexión de tramos.

5. Unión de tramos para la viga interior.

La unión de los tramos se realiza mediante el encaje de las uniones macho-hembra, a la cual se le introduce adhesivo dentro de la unión para conseguir una robustez permanente. Además previo a la unión se introducen fundas termorretráctiles de cableado en los tramos para una vez secada la unión con adhesivo, deslizar sobre la unión los tramos de termorretráctil y aplicar calor en la misma, consiguiendo su contracción y sellando la unión para protegerla de

humedades. (Figura 4-37)

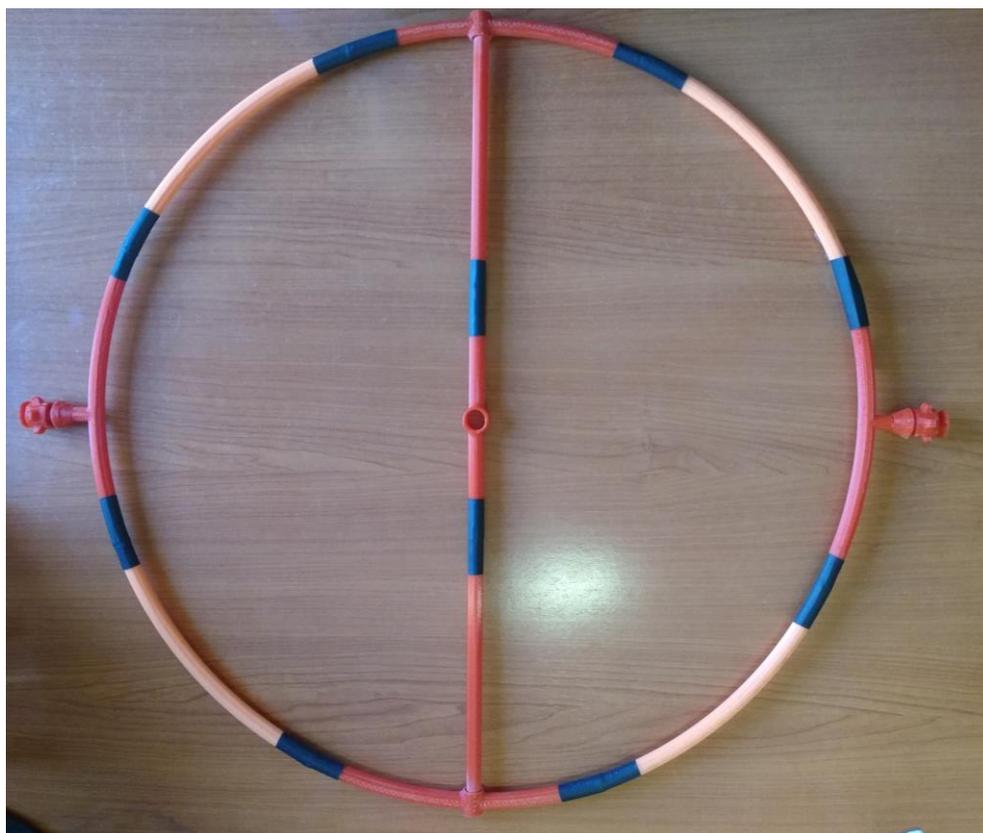


Figura 4-38. Ensamble giroscopio.

6. Unión de tramos para el anillo exterior.

Para la ensablado de los tramos del anillo ha sido necesario realizar la operación en dos partes, dos semianillos que se unen encerrando la viga interior en sus pares de rotación. La operación es similar a la anterior, encajando las uniones macho-hembra con sus pestañas de orientación, aplicando adhesivos y también usando fundas termorretráctiles, que sellan las uniones de los 8 tramos del aro. (Figura 4-38)

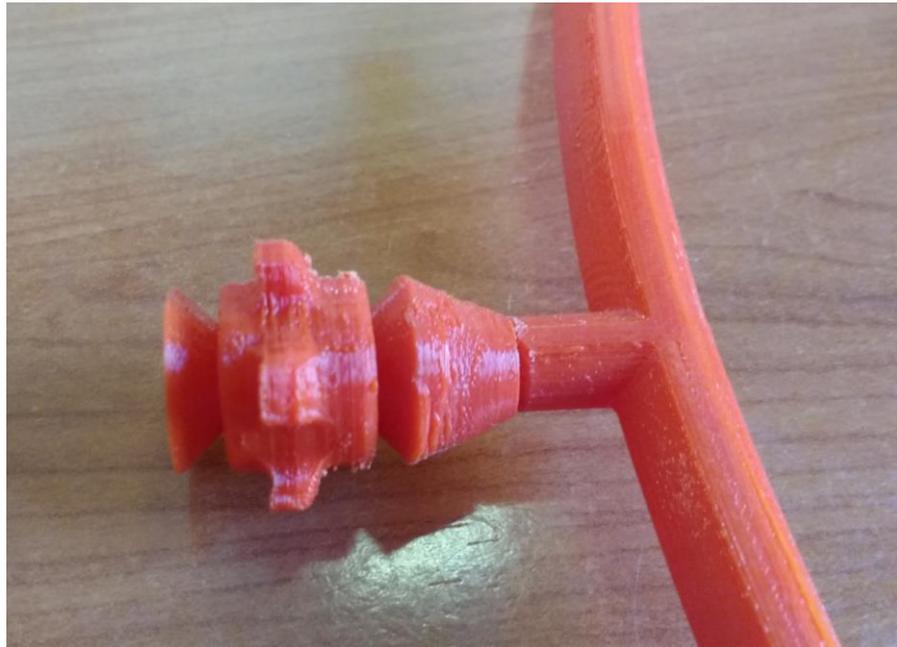


Figura 4-39. Diábolos exteriores.

7. Unión de los diábolos exteriores.

Para introducir la parte hembra del diábolo exterior en los tramos salientes del aro, solo es necesario aplicar adhesivo en las uniones y simplemente realizar un encaje macho-hembra de las piezas igual que en casos anteriores (*Figura 4-39*). Se reserva de momento la unión de la parte macho del diábolo con la parte hembra, puesto que primero debemos introducir las camisas para unirlo con la bola, proceso que se realizará más adelante.



Figura 4-40. Ensamble dron y giroscopio.

8. Unión diábolo interno y montaje de la cámara.

En esta etapa se introduce el saliente del pivote macho, que lleva unido el multirroto, por la camisa de la viga central para así de esta manera cerrar el diábolo por arriba con el pivote hembra (*Figura 4-40*). Al unir el pivote hembra con adhesivo mediante unión macho-hembra de ambas partes, el diábolo queda encerrado en el par rotación y con este también todo el multirroto. Sólo queda a continuación unir la base de la cámara con unos orificios a la plataforma del pivote hembra mediante finos alambres, además de taladrar por el centro del diábolo para pasar un cable desde la cámara en la parte superior hasta la batería en la parte inferior.

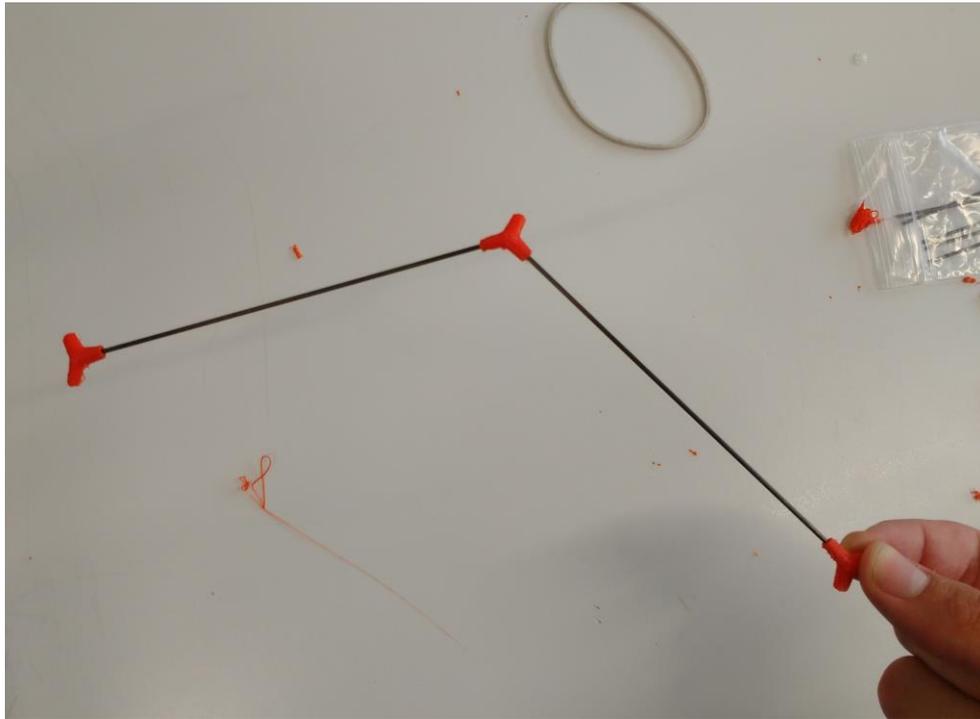


Figura 4-41. Ensamble esfera protectora.

9. Proceso de montaje de la bola.

Este es un proceso tedioso y algo artesanal, puesto que consiste en unir las varillas de fibra de carbono (previamente cortadas a la longitud necesaria) con las piezas de unión, que disponen de unos orificios los cuales previamente hay que liberar de posibles virutas con una aguja gruesa (*Figura 4-41*). Esta unión que es simple y de encaje hay que realizarla con las 90 aristas y los 60 vértices del icosaedro truncado, cabe destacar que es recomendable primero ensamblar sin pegamento, y una vez tenga la forma, repasar todas las uniones deshaciéndolas e introduciendo pegamento una a una. Todo este proceso se debe hacer en dos partes, primero media esfera, a continuación se realiza el paso 10 de unión a los pulpos del diábolo, y posteriormente se completa el proceso para encerrar el aparato dentro de la misma.

10. Uniones de la bola con los pulpos de los diábolos.

Para el matrimonio entre la esfera y el giroscopio, es necesario el uso de las uniones especiales en dos de los pentágonos contrapuestos. Mediante estos vértices especiales se colocan varillas de fibra de carbono formando una pirámide pentagonal que apunta hacia dentro de la esfera, es este el momento en el que se encajan las puntas de la pirámide a las

orejetas de la camisa, previamente taladradas para la unión adhesiva con las varillas. Una vez unido giroscopio con esfera, se continua ensamblando la misma como se indica en el paso anterior.

11. Últimos retoques e iluminación.

Sólo queda darle unos últimos retoques a todas las uniones rígidas y todos los soportes montados en el aparato para afianzarlos. Además se adhiere con cinta adhesiva unos pequeños LED alrededor de la cámara para una iluminación artificial provisional.

5 CONCLUSIÓN Y POSIBILIDADES DE MEJORA

5.1 Conclusión

Como conclusión a este proyecto cabe destacar su concepción, todo ello surgió de la clara necesidad de mejorar las condiciones de un trabajo rutinario como es la inspección de la red, tanto su repercusión para prevenir riesgos laborales innecesarios como por el rendimiento de trabajo que proporciona. Fue claro de ver que en lugar de meter personas a caminar por los conductos con la mera finalidad de detectar visualmente imperfecciones, se podría sustituir las personas por algún tipo de máquina o aparato.

Además de evitar meter personas en espacios confinados, el simple hecho de echar a volar un dron y recogerlo después con las imágenes ya capturadas, sin necesidad de preparar ni al personal ni los equipos, permite realizar las inspecciones en tiempos muy reducidos en comparación.

Se ha seguido un orden lógico en los razonamientos de los modelos, y se puede comprobar el hecho de que crear aparatos de bajo coste, no es sólo competencias de grandes industrias, es accesible a día de hoy desde cualquier hogar. Todo ello gracias a las nuevas tecnologías de fabricación aditiva al alcance de todos, y gracias al ingenio y la necesidad.

Modelado rápido y prueba-error, las futuras iteraciones del modelo de escaso coste permitirán perfeccionar esta metodología de trabajo, además de poder aplicar estos aparatos a muchos más ambitos de trabajo en espacios confinados.

5.2 Posibilidades de mejora, segunda iteración.

Este apartado quizás sea el más importante en el documento, aquí se van a establecer las directrices futuras para convertir un simple prototipo en un producto de gran rendimiento y fiabilidad. Una vez logrado un primer prototipo es fácil ver sus carencias y sus puntos fuertes, es necesario analizar con detalle el aparato para discernir si se esta atajando el problema de la manera adecuada, además de marcar los objetivos futuros para cubrir sus carencias.

La principal carencia del prototipo son las piezas adquiridas para su creación, puesto que el modelado de su estructura siempre se puede pulir y mejorar en los modelos. Al ser este un proyecto de bajo coste, para analizar la vía de resolución del problema y valorar como punto de retorno, si no es el camino adecuado, siempre se puede volver al inicio o un punto intermedio del proyecto. A continuación vamos a listar los principales puntos a mejorar vista a una segunda iteración del prototipo:

- Elementos del multirroto. Todo lo referente a la sustentación en vuelo del mismo, como son las hélices, los motores, los controladores de motor, el microcontrolador de procesamiento y las baterías. Los materiales empleados en el prototipo actual tienen escasa potencia y fiabilidad, para la futura transformación es necesario considerar motores de mayor potencia y hélices que proporcionen una mayor sustentación. También es necesario afinar el control con el microcontrolador y los controladores de los motores. Todo ello pasa por conseguir baterías de mayor capacidad y ligero peso.

- Cámara y sistema de visión FPV (First Person View). Hasta ahora la cámara y sistema FPV empleado para el control del aparato consisten en un teléfono smartphone con unas gafas VR de cartón y una cámara que transmite por frecuencia wifi a tiempo real en 720p, además de tener un bajo FPS (imágenes por segundo) que unido a la calidad de la señal producen en la transmisión del vídeo pequeños cortes de imágenes que afecta a la visualización del operario. Es necesario dotar al aparato de una cámara con gran angular de alta resolución y con una buena transmisión de señal, además de todo el sistema FPV en su conjunto.



Figura 5-1. Sensor óptico y de ultrasonido.

- Sensores. Además de afinar el control del aparato, también se considera implementar en éste sensores de proximidad, bien infrarrojos o de ultrasonidos (*Figura 5-1*), antojándose los primeros como mejor opción. Ésto mejorara enormemente el control del aparato, siendo capaz el mismo mediante la programación adecuada de evitar ciertas colisiones. A parte de los sensores de proximidad, existen una gran cantidad de sensores e instrumentación a considerar, puesto que para el interés del proyecto podrían ser de ayuda sensores de humedad o calidad del aire por ejemplo.
- Estructura. Tanto la esfera como el resto de la estructura, es posible mejorarlo con materiales de mejor resistencia/peso, éste es el caso de la fibra de carbono empleada en las varillas del prototipo por ejemplo. No sólo se plantea la posibilidad de mejora en los materiales empleados y además en el método de fabricación, sino que se considerará el refuerzo del icosaedro truncado, con más elementos o barras en el mismo para ofrecer una mayor protección.

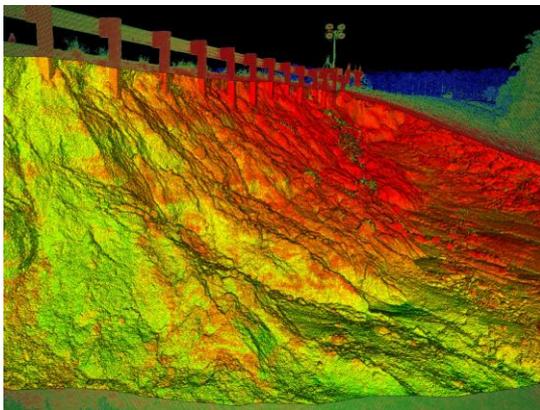


Figura 5-2. Imágenes obtenidas por lidar. Figura 5-3. Dron con dispositivo lidar implementado.

- Implementación de un LIDAR (acrónimo del inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging). Este elemento ampliamente empleado en múltiples aplicaciones, en concreto para aplicaciones de UAV en espacios abiertos, permite la creación

de un mapa tridimensional de la zona de inspección. De esta manera se podría conseguir un mapeado de las conducciones permitiendo conseguir por ordenador un mapa tridimensional de las conducciones y sirviendo de nueva fuente de información de las redes, sobretodo para la detección de defectos estructurales en la misma.

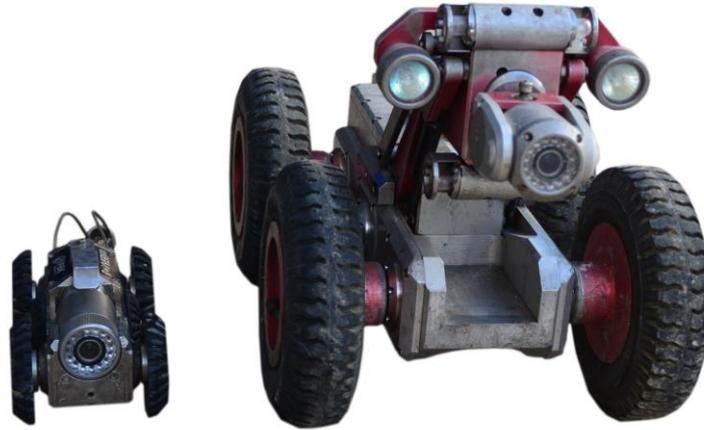


Figura 5-4. Vehículos de inspecciones de televisión.

- Nuevos métodos de acceso de señal. Para el acceso a zonas complicadas de la red, como ya se está usando en trabajos rutinarios, se considera la posibilidad de usar un vehículo anfibia como portador del aparato dentro de las conducciones. Este vehículo haría las veces de base de despegue y aterrizaje para el dron, siendo la finalidad del mismo servir de punto móvil de acceso de la señal. Vehículos de esta tipología se están utilizando para inspecciones de televisión de los colectores (*Figura 5-4*). Este nuevo vehículo (*Figura 5-5*) se presentaría como un aliado del dron para situaciones y zonas más complicadas, tanto por el acceso aéreo como por la imposibilidad de acceso de la señal.
- Mejoras en la iluminación artificial. Es posible mejorar las condiciones de iluminación mediante leds colocados alrededor del objetivo de la cámara, una manera sencilla de llevar la luz a donde se mire. Sólo basta con considerar el consumo de los mismos para las necesidades energéticas del aparato.

5.3 Impacto económico y social

En este apartado se pretende realizar una breve reflexión sobre la repercusión real de este proyecto, tanto de manera económica como de manera social.

Primero trataremos con numeros gordos la parte económica, siendo el coste en material del actual prototipo que se presentará junto con este documento del orden de unos 120 euros. De ese coste de material, unos 80 euros pertenecen al dron compuesto de motores, procesador, emisora, baterías y cámara FPV; mientras que otros 30 pertenecen al coste de las varillas de fibra de carbono de 1,5 mm de diámetro; y otros 10 euros representa el coste del material plástico empleado en las piezas impresas (PLA).

Para estimar un coste real de un prototipo de similares características, debería sumarse a estos 120 euros el coste de fabricación y de diseño del mismo. Como número gordo aplicaremos un factor 5 de sobredimensionamiento del coste, estimando pues 600 euros como coste real de puesta en

funcionamiento de un prototipo de las características del actual. Si tenemos en cuenta que se pretende mejorar la calidad de los componentes empleados, podríamos aplicar un factor 2 sobre la cantidad anterior para la mejora de la calidad del material. Estaríamos hablando pues, del orden de unos 1000 euros.

Para poder comparar esta cantidad es preciso mencionar, sin entrar en demasiados detalles, los recursos necesarios por parte de la empresa municipal para poder realizar el trabajo con los procedimientos actuales. Las inspecciones de estructura de conducciones de saneamiento requieren un mínimo según los procedimientos establecidos de 4 operarios para la inspección y un equipo móvil (vehículo especializado), además de toda la instrumentación necesaria para las inspecciones en espacios confinados que son: trípode y arnés de seguridad, equipos de respiración artificial, detectores de gases, monos impermeables de trabajo, equipo de televisión, cámaras fotográficas, EPIs (Equipos de Protección Individual) individuales de seguridad... y otros instrumentos necesarios más.

A grandes rasgos el tener a 4 personas durante varias horas inspeccionando conducciones de escasos metros de longitud, sólo en coste de personal se podría ahorrar. Las inspecciones con el dron puede reducir el equipo humano a 2 personas, siendo el ahorro para la empresa de unos 350 euros por cada día de inspección en el sueldo bruto de dos operarios de categoría labora Oficial de 1º, todo ello sin contar el ahorro de la instrumentación requerida para poder meter personas en espacios confinados.

El impacto económico es claro, pero es necesario tener en cuenta además el impacto social, puesto que estamos evitando que en la mayoría de los casos tengan que entrar personas en alcantarillados confinados, siendo una práctica de elevado riesgo puesto que dichas atmósferas además de ser contaminantes pueden ser explosivas también. Todo ello sin contar el riesgo que producen las lluvias, puesto que durante la inspección los operarios pueden resultar arrastrados por el aumento repentino de caudal provocado por las mismas, lluvias que no necesariamente tienen que producirse en el lugar de la inspección, porque toda la ciudad y el área metropolitana están conectadas mediante las mismas redes.

Sólo ha sido necesario mencionar estos aspectos para la comprensión del fuerte impacto económico y social de este proyecto sobre la realidad.

REFERENCIAS

- <http://www.leon-3d.es/guia-de-resolucion-de-problemas/>
- <https://droningpage.wordpress.com/2014/10/19/que-partes-componen-un-drone-multirotor/>
- <https://www.wikipedia.org/>
- <http://www.emasesa.com/>
- <http://reprap.org/wiki/RepRap/es>
- <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- S. Kalpakjian, S. Schmid (2002). Manufactura, ingeniería y tecnología (capítulo 19)
- Porras Rodríguez, M. Análisis técnico-económico de técnicas de fabricación aditiva para aplicación en diferentes sectores industriales. ICAI – Universidad Pontificia Comillas (2012).
- Delgado González, J. E. Diseño y cálculo FEM de estructura para tetracóptero nano UAV de apoyo a pequeñas unidades de Infantería de Marina. Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (2015).
- Ramos Vicedo, V. Diseño e implementación de un quadcopter basado en microcontrolador arduino. Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales de Valencia (2014).