



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**APLICACIÓN DE DRONES
(UAVs Y RPAS) A LA
AGRICULTURA DE PRECISIÓN.
MEJORAS MEDIANTE LA
UTILIZACIÓN DE MATERIALES
COMPUESTOS Y
PROTOTIPADO RÁPIDO**

Alumno: Miguel Ángel Almazán Lázaro

Tutor: Prof. D. Elías López Alba
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2016



Agradecer a aquellas personas
que han hecho posible la realización
de este trabajo y lo que ello conlleva.
Dedicado a mi familia por su esfuerzo, apoyo y consejos.

Cada día sabemos más y entendemos menos.

Albert Einstein

Contenido

1.	RESUMEN	12
2.	JUSTIFICACIÓN	13
3.	ESTADO DEL ARTE	15
4.	INTRODUCCIÓN. AERONAVES NO TRIPULADAS	16
4.1.	Breve historia: el comienzo de la aviación aérea	16
4.2.	Actualidad	17
4.3.	Perspectiva de futuro	17
5.	DEFINICIONES PREVIAS	19
	UAV	19
	RPAS	19
	Drone	19
6.	CLASIFICACIÓN DE AERONAVES.....	20
6.1.	Según la sustentación.....	20
6.1.1.	Aeróstatos.....	20
6.1.2.	Aerodinos	20
6.2.	Según altitud y alcance	20
6.3.	UAVs de ala rotatoria	22
6.3.1.	Partes principales. Célula de una aeronave	23
7.	PRINCIPIOS BÁSICOS EN MECÁNICA DEL VUELO	25
7.1.	Movimientos de la aeronave	25
7.2.	Fuerzas que actúan sobre aeronave.....	26
8.	APLICACIONES ACTUALES.....	27
8.1.	UAV en la agricultura.....	28
9.	AGRICULTURA DE PRECISIÓN	29
10.	NECESIDAD Y PROBLEMA A SUPLIR	31
10.1.	Descripción de la tarea a realizar	31
10.2.	Descripción de funcionamiento del vehículo.....	31
11.	CONTROL	32
11.1.	Control del vehículo	32
11.1.1.	Manual	32
11.1.2.	Automático	32
11.1.3.	Modos de vuelo	32
11.2.	Control de deflectores.....	34
11.2.1.	Manual	34
11.2.2.	Automático	34
12.	ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA	35
12.1.	Elementos comunes	36
12.1.1.	Antenas	36
12.1.2.	Tipos de antenas	37
12.1.2.1.	Antenas direccionales	37

- Tipo panel, patch	37
- Tipo hélice, helical	38
12.1.2.2. Antenas omnidireccionales	38
12.1.2.3. Patrón de radiación	39
12.1.2.4. Ganancia	39
12.1.2.5. Ancho de banda	40
12.1.2.6. Polarización	40
- Lineal.....	41
- Circular	41
- Elíptica.....	41
12.1.3. Orientación de antenas	41
12.1.4. Justificación de la selección de antenas.....	42
12.2. Baterías	42
12.2.1. Tipos.....	43
12.2.2. Litio Polímero	43
12.2.2.1. Carga.....	44
12.2.2.2. Descarga	44
12.2.2.2.1. Velocidad de descarga.....	45
12.3. FPV. First Person View	46
12.4. En UAV	46
12.4.1. Receptor	46
12.4.2. Motores	47
12.4.3. ESC. Electronic Speed Controller	51
12.4.4. Controladora de vuelo	51
12.4.5. Elementos auxiliares	53
12.4.5.1. FPV	53
12.4.5.1.1. Emisor de video.....	53
12.4.5.1.2. Cámara de video.....	54
12.4.5.1.3. Telemetría	54
12.4.6. Sensores.....	55
12.4.6.1. Tipos de sensores	55
12.4.6.1.1. GPS	55
12.4.6.1.2. Acelerómetro + Giróscopo	55
12.5. Estación de tierra	56
12.5.1. Emisora	56
12.5.1.1. Canales.....	56
12.5.1.2. Tipología.....	57
12.5.1.3. Alimentación emisora	57
12.5.1.4. Programación de emisora.....	58
12.5.2. Receptor señal de video (FPV).....	59
12.5.3. Monitor o gafas virtuales.....	59
12.5.4. Selección de componentes.....	60

12.5.4.1.	Motor - Hélice.....	60
12.5.4.1.1.	Curvas características del motor.....	61
12.5.4.1.2.	Curvas características de la hélice	65
12.5.4.2.	Variadores de velocidad. ESC.	66
12.5.4.3.	Baterías	67
12.5.4.4.	Controladora de vuelo.....	67
12.6.	En mecanismo de pulverización	68
12.6.1.	Elementos comunes.....	69
12.6.1.1.	Servos	69
12.6.2.	Versión I. Estabilizado	70
12.6.2.1.	Turbina.....	70
12.6.2.1.1.	Estimación teórica y ensayo experimental	71
13.6.2.1	ESC	73
12.6.3.	Estabilizador del deflector versión I.....	74
12.6.4.	Deflector tipo II.....	76
12.6.5.	Sensores a implementar en trabajo futuro	77
12.7.	Diagramas de conexión	78
13.	ANÁLISIS MECÁNICOS	80
13.1.	Optimización topológica.....	80
14.1.1	Introducción	80
14.1.2	Formulación	80
14.1.3	Variables de diseño	81
14.1.4	Función objetivo.....	82
14.1.5	Restricciones	82
14.1.6	Procedimiento	83
14.1.7	Mallado	84
14.1.7.1	Elementos utilizados	86
14.1.8	Criterio de unidades	87
14.1.8.1	Estrategia	87
14.1.8.2	Funciones objetivo.....	87
14.1.8.3	Supuestos de carga RPAS 2-8 kg.....	88
14.1.8.3.1	Cargas extremidad.....	88
14.1.8.5.1.1.	Empuje del motor vertical	88
14.1.8.5.1.2.	Vibración de hélice.....	88
14.1.8.5.1.3.	Par de giro originado por el motor.....	89
14.1.8.5.1.4.	Carga placa central inferior	89
14.1.8.5.	Modelización de las cargas en Abaqus®.	90
14.1.8.6.	Modelización de las condiciones de contorno en Abaqus.....	91
14.1.9.	Resultados.....	91
14.1.10.	Modelado del componente	93
15.	ANÁLISIS DE FLUJOS DE AIRE	95
15.1.	Estela en el vehículo.	95

15.1.1.	Generación de geometría.....	95
15.1.2.	Malla	96
15.2.	Conjunto deflector tipo I con turbina.....	103
15.3.	Deflector tipo II	106
15.3.1.	Estimación de la tensión del tensor	111
15.3.2.	Posiciones del deflector.....	115
16.	SUMINISTRO FITOSANITARIO	117
16.1.	Desde el propio vehículo	117
16.2.	Vehículo propuesto autónomo	118
16.2.1.	Descripción	118
16.2.2.	Ventajas e inconvenientes	120
16.2.3.	Vehículo simplificado para pruebas experimentales futuras	121
16.2.4.	Justificación.....	122
16.2.4.1.	Depósito de fitosanitario	124
16.2.4.2.	Generador de electricidad	124
16.2.4.3.	Convertidor 220-12 V	126
16.2.4.4.	PLC	126
16.2.4.5.	Servos	126
16.2.4.6.	Bomba.....	127
16.2.4.6.1.	Pérdidas de carga en instalación. Curva del sistema	128
16.2.4.6.2.	Curva de la bomba.....	129
16.2.4.6.3.	Punto de trabajo.....	131
16.2.4.6.4.	Regulación de la bomba	132
16.2.4.7.	Controladores motores - motores	134
16.2.4.8.	Ruedas.....	137
16.2.4.9.	Chasis.....	137
16.2.4.9.1.	Comprobación a resistencia del perno.....	139
16.2.4.9.2.	Comprobación de esfuerzo axil en rodamientos axiales.....	140
16.2.4.9.3.	Comprobación de rodamientos radiales	144
16.2.4.9.4.	Comprobación del eje que soporta la rueda.....	146
16.2.5.	Suministro controlado del conducto que comunica ambos vehículos	148
15.1.1.	Propuestas de mejora en vehículo terrestre	152
17.	FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO	154
17.1.	Medios de fabricación	154
17.1.1.	Fabricación en material compuesto	154
17.1.2.	Fabricación mediante prototipado rápido	154
17.1.2.1.	Selección del material	155
17.1.2.2.	Preparación de modelos	155
17.2.	Vehículo aéreo	156
17.2.1.	Extremidades o arm.....	156
17.2.2.	Tren de aterrizaje.....	158
17.2.3.	Montaje	159

17.2.4.	Puesta a punto	162
17.2.4.1.	Previa al vuelo	162
17.2.4.2.	Durante el vuelo	162
17.2.4.3.	Posterior al vuelo	163
17.3.	Deflector tipo I.	163
17.4.	Deflector tipo II	165
18.	Parámetros de programación a controlar	169
18.1.	EN UAV	169
18.1.1.	PID	169
18.1.1.1.	Procedimiento de ajuste PID.....	169
18.1.1.2.	Influencia de los parámetros	172
18.1.1.2.1.	Basic Gain	172
18.1.1.2.2.	Attitude Gain	172
18.1.1.3.	Parámetros óptimos.....	173
18.1.1.4.	En deflector.....	174
19.	PRUEBAS EXPERIMENTALES	175
19.1.	Previas a la realización del estudio	175
20.	CONCLUSIONES.....	178
✓	Ventajas	178
✓	Inconvenientes.....	179
21.	TRABAJO FUTURO	179
22.	ANEXOS.....	181
22.1.	Análisis de impacto vehículo aéreo	181
22.1.1.	Materiales	181
22.1.1.1.	Nylon 6/6 (PA) Glass Fiber	181
22.1.1.2.	Asfalto/ hormigón	182
22.1.2.	Modelo	183
22.2.	Resultados	184
22.3.	Boquilla de pulverización	188
22.3.1.	Portaboquilla utilizado	189
22.4.	Banco de ensayo de motores eléctricos de aeromodelismo	190
22.5.	Patentes relacionadas	194
	Largely autonomous flying UAV helicopter drone for the application of pesticides in agriculture, forestry and viticulture.....	194
	Pesticide spraying unmanned aerial vehicle capable of precisely spraying pesticides.	194
	Soft liquid pesticide box	194
	Aerial vehicle for agriculture and forestry	195
	Unmanned helicopter spraying device capable of more accurately controlling spraying area	195
	Two-vehicle wide pesticide spraying unmanned aerial vehicle (UAV).....	195
	Agricultural unmanned machine.....	195
	A UAV for pesticide spraying	195
	Method of adjusting plant protection spraying system of single-rotor agricultural unmanned aerial vehicle	196

Spray head withdrawing/stretching device of agricultural unmanned plane for plant protection....	196
22.6. PROGRAMAS ARDUINO	197
Lectura señal de PWM en receptor de la emisora principal.....	197
22.7. OPTIMIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA.....	198
22.8. MANUAL DE USUARIO.....	200
22.8.1. Carga de baterías	200
22.8.2. Controles principales.....	200
22.8.3. Stick izquierdo	201
22.8.4. Stick derecho	202
22.9. MANUAL DE OPERACIONES	204
22.9.1. Previos al vuelo	204
22.9.2. Preparación del vuelo	205
22.9.3. Comienzo del vuelo.....	205
22.9.4. Durante el vuelo	206
20.8.5 Finalización del vuelo	207
22.10. Terminología	208
23. PRESUPUESTO.....	209
23.1. Precios unitarios	209
Chasis 209	
Instalación de alta intensidad.....	211
Instalación de baja intensidad	212
Instalación de fitosanitario para el vehículo de tierra	214
Instalación de fitosanitario desde el propio vehículo	216
Mecánica del vehículo de tierra suministrador de energía y fitosanitario	217
Dispositivo de arrollamiento automático de manguera.....	218
Deflector tipo I, estructura	219
Deflector tipo I instalación eléctrica	220
Deflector tipo II estructura.....	221
Instalación eléctrica deflector II	222
Estación de tierra	223
Almacenamiento de energía.....	224
Mano de obra	226
23.2. Presupuestos parciales	227
Chasis 227	
Instalación de alta intensidad.....	229
Instalación de baja intensidad	231
Instalación de fitosanitario para estación de tierra.....	233
Instalación de fitosanitario desde el propio vehículo	235
Mecánica del vehículo de tierra suministrador de energía y fitosanitario	236
Dispositivo de arrollamiento automático de manguera.....	238
Deflector tipo I, estructura	240
Deflector tipo I instalación eléctrica	241

Deflector tipo II estructura.....	242
Instalación eléctrica deflector II	243
Estación de tierra	244
Almacenamiento de energía.....	245
Mano de obra.....	247
23.3. Presupuesto general	248
24. PLANOS	250
25. BIBLIOGRAFÍA.....	251

1. RESUMEN

Este trabajo trata de desarrollar una aplicación para los vehículos aéreos no tripulados en el campo de la agricultura de precisión, ornamental o de producción, Figura 1.

Para ello se han realizado modelos CAD, simulaciones de elementos mecánicos mediante Abaqus® y simulaciones de fluidos usando Fluent®, para finalmente fabricar dicho prototipo mediante FDM y en un futuro con materiales compuestos. Previamente a todo ello, se realizaron pruebas experimentales para comprobar si la idea podría llevarse a cabo.



Figura 1. Jardín vertical Caixa Forum, Madrid. 24 m (izquierda). Chirimoyos, cultivo subtropical en pendiente (derecha)

Se vio la necesidad de aplicar fluido fitosanitario, y que este fuera arrastrado por el aire. Además, se estudió la posibilidad de realizarlo desde el aire, surgiendo la

necesidad de aplicarlo a plantaciones en las que sea inaccesible vehículos terrestres, o para usos concretos en determinados puntos.

Este trabajo se centra en la parte mecánica, pero abarca diversas áreas del conocimiento, como electrónica, electricidad, aeronáutica y programación, recurriendo a ellas para justificar los elementos más importantes.

Al ser un campo de estudio relativamente reciente existe un gran abanico de posibilidades de análisis en estudios futuros, como se mostrará a lo largo del documento. Además, todo lo realizado y propuesto en el documento tiene posibilidades de mejora, ya que como se ha mencionado, es un trabajo específico pero que necesita de muchas disciplinas del conocimiento.

Uno de los objetivos requeridos es que sea sencillo de utilizar, seguro y eficiente, y para ello se requiere experiencia en cuanto a que el diseño de un producto final es iterativo, por lo que se requiere de tiempo de maduración para llegar a un producto acabado y/o comercial.

2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto surge como consecuencia del incipiente desarrollo de la industria aeronáutica a baja escala, consecuencia del desarrollo y abaratamiento de costes de los vehículos.

Por otro lado, se tiene la necesidad de automatizar y agilizar diversas tareas en la agricultura, así como no solo actuar en una determinada plantación sólo desde la tierra, sino que actuar en ella también desde el aire.

El objetivo del presente TFG es cubrir algunas deficiencias de los sistemas actuales en



Figura 2. UAV VTOL con ala fija. (Post-Afghanistan Era, 2014)

la aplicación de fitosanitarios, más concretamente orientado a la agricultura de precisión, utilizando vehículos aéreos no tripulados. Como se explicará más adelante nos centraremos en multirrotores, ya que será más adecuado para la tipología de cultivo que se pretende cubrir.

Por lo tanto, en este documento se desarrollarán los elementos necesarios para la aplicación de fitosanitarios mediante la utilización de dichos vehículos, permitiendo direccionar el flujo de aire y que este arrastre a su vez al fluido fitosanitario. Todo ello de forma autónoma, pero sencilla, de forma que cualquier usuario con una baja cualificación sea capaz de realizar dichas operaciones.

La fabricación del prototipo se realizará mediante FDM (Fused Deposition Modeling) proponiéndose para versiones futuras dicha fabricación mediante la utilización de materiales compuestos. Las técnicas de prototipado rápido ofrecen un coste reducido, con unas propiedades mecánicas aceptables, siendo flexible en formas y geometrías, y por tanto cada vez más utilizado en la industria aeronáutica, como apoyo o soporte para otros procesos de fabricación.

Así, con el presente documento se propone una alternativa en cuanto a la aplicación de productos fitosanitarios, encontrando sus principales ventajas en cultivos distintos a los convencionales, como son las plantaciones ornamentales o en invernadero.

3. ESTADO DEL ARTE

Actualmente la aplicación de productos fitosanitarios con vehículos aéreos es una realidad, existen diversas experiencias relacionadas con dicho objetivo. Se encuentran diversos estudios y patentes, además de productos comerciales finales para la aplicación de fitosanitarios, como se muestra en la Figura 3. Pero todos ellos tienen en común la problemática que no se orienta ni dirige el producto fitosanitario al lugar adecuado, en algunos casos la boquilla se sitúa con distintas orientaciones, pero no se aprovecha el aire generado o el fluido no se transporta mediante aire. Destacando la importancia del transporte de fitosanitario con aire, y es que, se consigue una mejor distribución del producto fitosanitario en la plantación cuando este es pulverizado con aire.

Por tanto, en el estado del arte actual se tienen dos vertientes diferenciadas, por una parte, existen estudios en los que

- se aprovecha el aire generado en el vehículo para proyectar el fluido fitosanitario de forma vertical. Es por lo que, sería imposible de aplicar en plantación de porte esbelta, siendo adecuado para grandes extensiones de cultivo.

Mientras que otros estudios

- Orientan la boquilla en la dirección deseada, no utilizando el aire generado en el vehículo, por lo que no se tienen los beneficios que nos aporta el aire.

Es por lo anterior, que surge la necesidad de proyectar el aire en la dirección deseada, proponiendo en este documento dos soluciones para ello. En el anexo se adjuntan las patentes relacionadas (sección 22.5, página 194), entrando en detalle en ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.



Figura 3. FH-8Z-10 UAV Drone Crop Sprayer. Solución comercial para aplicación de fitosanitarios. (Sprayer.)

4. INTRODUCCIÓN. AERONAVES NO TRIPULADAS



Figura 4. Globos UAV. (Historia)

4.1. Breve historia: el comienzo de la aviación aérea

La historia de los UAV comienza casi al mismo tiempo que la historia de la aviación. La fecha y autor del primer vehículo autónomo es confusa, unos consideran que fue en la civilización China, con cometas (1), mientras que otros consideran que fueron los australianos con balones (2) en fecha de 22 de agosto del 1849, todos ellos con origen militar.

En el segundo caso se trataba de una misión de más de 200 globos del ejército Austriaco, cuyo objetivo era caer sobre Venecia y explotar las bombas que estos portaban. Muchos de ellos no explotaron en el lugar adecuado, ya que dependía de la dirección del viento, explotándole incluso al propio ejército austriaco.



Figura 5. Sopwith AT (Aerial target) (The 'Aerial Target' and 'Aerial Torpedo' in Britain)

Posteriormente en la Primera Guerra Mundial se fabricó el Aerial Target (1916) y el Aerial Torpedo (McDaid, y otros, 1997), controlados con radiofrecuencia AM. Ese

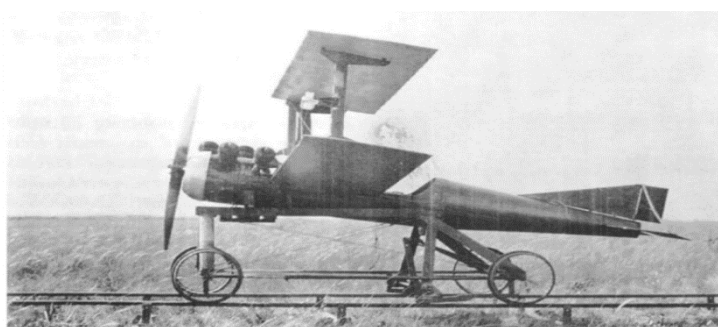


Figura 6. Liberty Eagle Aerial Torpedo (Zaloga)

mismo año hizo el primer vuelo el Hewitt Sperry Automatic Airplane conocido como la bomba volante.

La carrera aeronáutica no tripulada siguió su avance con la Segunda Guerra Mundial y la guerra fría.

4.2. Actualidad

En los últimos años se ha visto un rápido desarrollo de los vehículos autónomos cuya masa es menor a 25 kg. Ya existían sistemas autónomos, pero excesivamente caros, ya que este desarrollo provenía de la industria militar, principalmente de los Estados Unidos.

El principal cambio ocurrido en los recientes años ha sido consecuencia del crecimiento de la economía en China, se han economizado costes y los vehículos aéreos no tripulados están al alcance de usuarios civiles.

Actualmente en la cumbre del desarrollo de los UAV militares, se sitúa el Predator. El MQ-1 Predator calificado como MALE (Medium-Altitude Long-Endurance) es desarrollado por la fuerza aérea estadounidense y General Atomics Aeronautical System.

4.3. Perspectiva de futuro

Para esta parte de la industria aeronáutica se espera un futuro esperanzador, ya que presenta numerosas ventajas que cada día cobran más importancia para la sociedad.

El principal problema, actual y el de las próximas décadas, es el almacenamiento de energía, ya que las baterías de las que se disponen actualmente son excesivamente caras en relación a las prestaciones que nos aportan.

Hoy en día ya existe la electrónica que permite aproximarse a lo mencionado, pero aún falta por desarrollar medios de seguridad, para que pueda utilizarlo cualquier usuario, sin riesgo mecánico ni eléctrico y sin posibilidad de fallo.

También dichos vehículos podrían llevar asociado sistemas de generación de energía a bordo, como actualmente se hace con la pila de hidrógeno.

5. DEFINICIONES PREVIAS

Es importante destacar al comienzo del documento la importancia de estos conceptos, ya que se mencionarán repetidamente en el presente, además en la sección 22.10, página 208, existen más abreviaciones utilizadas.

UAV: es el acrónimo de *Unmanned Aerial Vehicle*. Teóricamente pueden ser pilotados por un piloto en tierra o de forma autónoma y preprogramada. El término se les aplica a vehículos que pueden volar de una forma u otra, o en combinación de ambas, no aplicándose a los vehículos que son controlados exclusivamente por un piloto desde tierra. Esto es, hay que distinguir de vehículo aéreo no tripulado autónomo de los que no son autónomos, aunque los segundos puedan funcionar como los primeros.

RPAS: Del inglés Remotely Piloted Aircraft System, es una subdivisión de los UAV. Es decir, todos los UAV son RPAS, ya que en todos (a veces por ley) los UAVs, el piloto puede tener control si lo desea, normalmente si se genera una situación de peligro.

Drone: Anglicismo de la palabra drone (en castellano, zángano). Usualmente se utiliza esta palabra para determinar a un vehículo aéreo autónomo, concepto que es erróneo, ya que puede generar confusión al creer que es un vehículo autónomo cuando en realidad no lo es.

6. CLASIFICACIÓN DE AERONAVES

6.1. Según la sustentación

6.1.1. Aeróstatos

- Son naves menos densas que el aire, su funcionamiento están basadas en el principio de Arquímedes. Son los actuales globos aerostáticos y dirigibles. Como ventaja se consiguen mayores autonomías con respecto a los vehículos de ala móvil.

6.1.2. Aerodinós

- Son todos los que no pertenecen al grupo anterior, siendo más pesados que el aire, obteniendo sustentación de las fuerzas aerodinámicas generadas en sus superficies. En unos casos dicha superficie serán las alas y en otros, como en nuestro caso, las propias hélices.

6.2. Según altitud y alcance

Como se aprecia en la siguiente tabla, el vehículo utilizado, desde el punto de vista de la legislación se considerará como micro, al no exceder en masa a 2 kg, pero con condiciones BVLOS Beyond Visual Line Of Sight.

NATO Classification

Class & Weight, w (kg)	Category & Weight, w (kg)	Normal Employment	Normal Operating Altitude, h (ft)	Normal Mission Radius (km)	Example Platform
Class I $w < 150$	Small $w > 20$ kg	Tactical Unit (employs launch system)	$h \leq 5000$ AGL	50 (LOS)	Luna, Hermes 90
	Mini $2 \leq w \leq 20$ kg	Tactical Unit (manual launch)	$h \leq 3000$ AGL	25 (LOS)	ScanEagle, Skylark, Raven, DH3, Aladin, Strix
	Micro $w < 2$	Tactical Patrol/section, Individual (single operator)	$h \leq 200$ AGL	5 (LOS)	Black Widow
Class II $150 \leq w \leq 600$	Tactical	Tactical Formation	$h \leq 10,000$ AGL	200 (LOS)	Sperwer, Iview 250, Hermes 450, Aerostar, Ranger
Class III $w > 600$	Strike/Combat	Strategic/National	$h \leq 65,000$	Unlimited (BLOS)	
	HALE	Strategic/National	$h \leq 65,000$	Unlimited (BLOS)	Global Hawk
	MALE	Operational/Theater	$h \leq 45,000$ MSL	Unlimited (BLOS)	Predator A, Predator B, Heron, Heron TP, Hermes 900

Figura 7. GIS595/MEA792: UAV/lidar Data Analytics course

6.3. UAVs de ala rotatoria

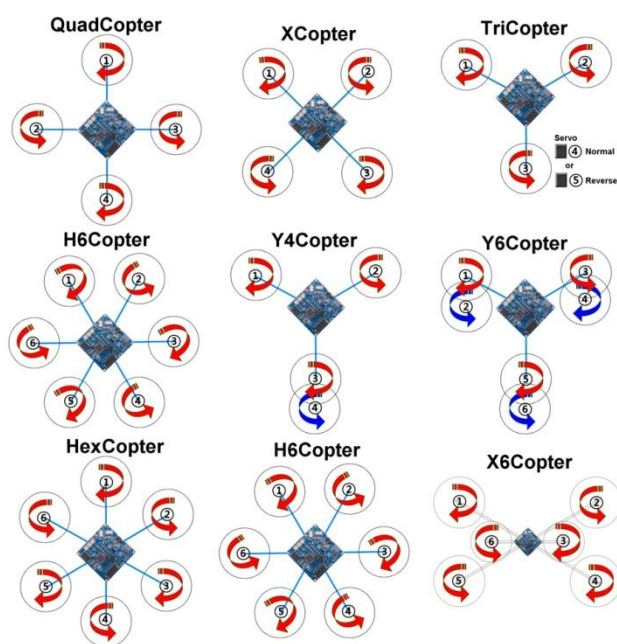


Figura 8. Distribución de hélices en distintas geometrías. Se consideran vehículos de ala rotatoria aquellos que es necesario el movimiento de una o más hélices para obtener sustentación, un rotor (monocóptero), dos rotores (helicóptero y bicóptero), 3 rotor (tricóptero), 4 rotor (cuadróptero), etc. Siendo lo más común y sencillo un número par de rotor para compensar el momento que se produce, por ello es tan común la distribución de cuatro rotores, al tener una buena relación entre carga de peso permitida y consumo de energía.

La principal ventaja respecto a los vehículos de ala fija es la maniobrabilidad, ya que pueden aterrizar y despegar de forma vertical, denominados VTOL (Vertical Take Off and Landing). Ello hace que sean ágiles, pudiendo rotar sobre su propio eje y moverse en todas las direcciones del espacio. Esta, por tanto, es la principal ventaja por la que se selecciona este tipo de vehículo para esta aplicación, ya que pueden aterrizar y despegar en zonas de reducido tamaño.

Otra ventaja es el reducido tamaño que pueden tener, por tanto, se reduce la complejidad para realizar pruebas experimentales. Además de una menor masa, menor coste de material y en general menor coste de fabricación.

Su principal inconveniente es que se consiguen menores tiempo de vuelo, ya que la sustentación se produce como consecuencia del movimiento constante de sus hélices. Actualmente la mayoría de los UAVs menores a 25kg son propulsados eléctricamente dependiendo completamente del almacenamiento de energía eléctrica de las baterías.

Son por tanto dos conceptos totalmente distintos y cada uno aportará beneficios para determinado tipo de aplicaciones. Actualmente, se está avanzando en sistemas combinados, para tener las ventajas de sistemas de ala fija junto con las ventajas de las alas



Figura 9. Proyecto Google Wing. Combina las ventajas de un ala fija y ala rotatoria.

móviles. Ello aumenta la complejidad del sistema, pero puede ser una vía importante para reducir el consumo energético y aumentar la autonomía de vuelo.

6.3.1. Partes principales. Célula de una aeronave

Las partes principales que se integran en un UAVs son comunes para vehículos de ala rotatoria y ala fija, siendo las más importantes el fuselaje, alas y/o hélices y tren de aterrizaje. (Casarrubios, 2016). La estructura de una aeronave o célula es su estructura mecánica, excluyendo la planta de potencia, aunque en helicópteros y multirrotores la planta de potencia si está incluida en la célula.

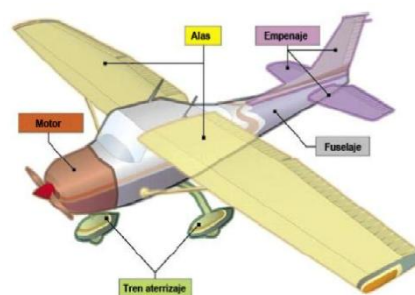


Figura 10. Partes principales de una aeronave de ala fija. (Andalucía, 2015)

Por lo tanto, la célula de un multirrotor comprende:

Fuselaje. En el caso de UAVs también se le denomina frame, siendo la estructura principal, su función es acoger la carga, controles, accesorios, pasajeros si los hubiera y el resto del equipamiento. Por tanto, contendrá los elementos mecánicos a analizar (Sección: 13. ANÁLISIS MECÁNICOS, página:80), como extremidades o arms.

Hélices. Las hélices consisten en dos o más palas unidas a un núcleo central o cubo (hub). Cada pala es un ala rotatoria, que al rotar produce sustentación,

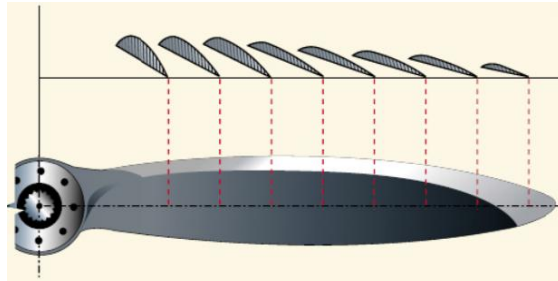


Figura 11. Secciones transversales hélice, se muestra de forma general como varía el ángulo de ataque del perfil para mantener un flujo másico constante. (Choosing the right propeller, 65).

denominada empuje. El empuje vendrá dado por la aceleración del aire que propulsa. Por tanto, la sección transversal de una hélice, está basada en los mismos perfiles aeronáuticos que los utilizados en las alas (Sección: 12.5.4.1.2 Curvas características de la hélice, página:

En las aeronaves de ala rotatoria, las hélices proporcionan tanto el empuje como sustentación.

Tren de aterrizaje. Conjunto de elementos cuya función es que el vehículo pueda tener contacto con tierra sin dañar otros elementos. Se diseñará y fabricará (Sección: 17.2.2 Tren de aterrizaje, página: 158)

7. PRINCIPIOS BÁSICOS EN MECÁNICA DEL VUELO

7.1. Movimientos de la aeronave

El vehículo puede realizar 4 movimientos en el espacio, estos son conocidos como throttle, pitch, roll y yaw (Figura 12), también se conocen como propulsión, cabeceo, alabeo y guiñada.

La siguiente imagen ilustra como modificando la potencia de determinados motores se consigue realizar un movimiento u otro.

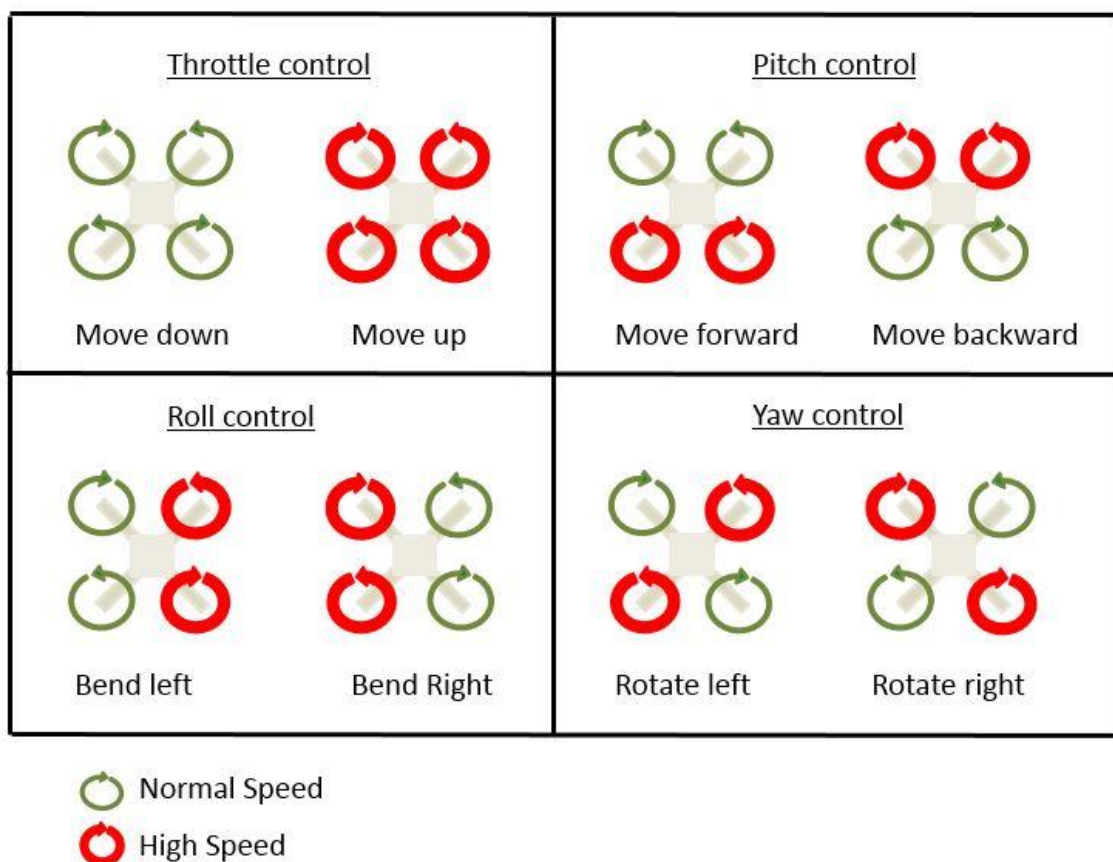


Figura 12. Movimientos de un multicoptero de 4 rotores, se muestra el sentido de rotación de las hélices, además en rojo se muestra el incremento de potencia que debe de realizarse en los motores para que el vehículo sea capaz de moverse. (Quadcopter)

Estos movimientos determinarán el número mínimo de canales proporcionales que se requieren en el control principal.

7.2. Fuerzas que actúan sobre aeronave

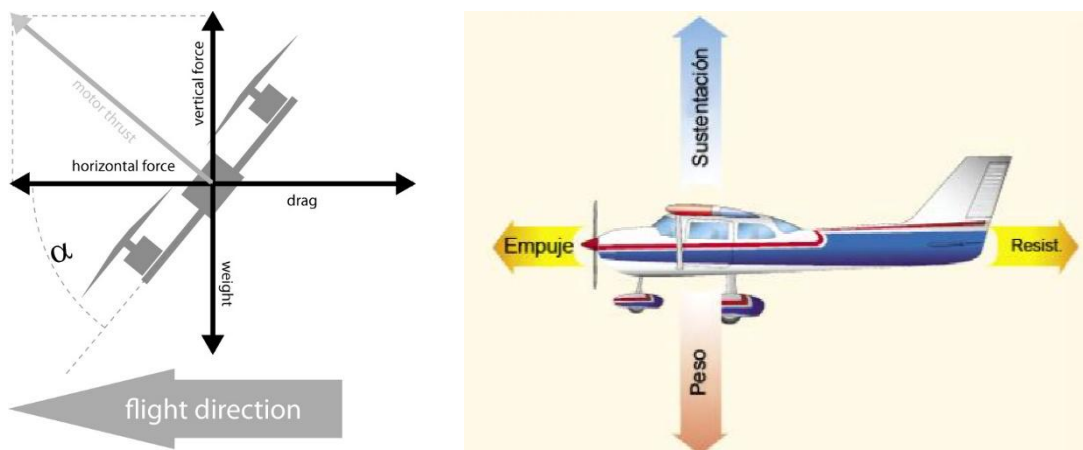


Figura 13. Las fuerzas que actúan sobre los vehículos son las mismas. (Izquierda) se muestra como si se tiene un ángulo de vuelo $\alpha=45^\circ$ el drag tiene la misma relevancia que el peso (Andalucía, 2015).

En todas las aeronaves actúan cuatro fuerzas, estas son: empuje, sustentación, resistencia y peso. Por lo tanto, en los RPAS también se tienen estas componentes, siendo fundamental su comprensión para el estudio del comportamiento de este.

El peso es el intuitivo, como consecuencia de su masa. La sustentación vertical ascendente, como consecuencia de las superficies aerodinámicas. El empuje es la fuerza producida por la planta de potencia, dirigida hacia delante impulsando la aeronave. La fuerza de resistencia es la que se opone al avance de la aeronave, es ejercida por el aire como consecuencia del rozamiento entre la aeronave y el aire. Si el vuelo es estacionario, el empuje será igual a la componente resistente, además el peso será igual a la sustentación.

8. APLICACIONES ACTUALES

Actualmente se encuentran una gran diversidad de aplicaciones para los UAVs menores a 25kg, surgiendo un gran número de aplicaciones o problemas a suplir, desde salvavidas con desfibriladores, aplicaciones en la pesca, salvamento en las costas, vigilancia y un gran número de aplicaciones militares.



Figura 14. Nitrofirex. Proyecto para extinción de incendios. (Andalucía., 2016)

En las distintas aplicaciones, se utilizan vehículos autónomos similares con diferentes acoplamientos y sensores como cargas de pago. Los sensores más comunes que se acoplan a los vehículos son cámaras de video del espectro visual (RGB), cámaras multiespectrales, hiperespectrales, térmicas o sensores LIDAR.

Con las cámaras en el espectro visual (RGB), se consigue una alta resolución y amplitud en sus imágenes, por lo que será útil para obtener una ortofoto de un determinado terreno o superficie (aplicable a la agricultura de precisión) (Andalucía, 2015). La información obtenida con el anterior, puede ser contrastada con la que nos aportan otros sensores, como cámaras térmicas, ya que obtener una ortofoto con una cámara térmica es más laborioso y complicado al tener una menor resolución y amplitud.

8.1. UAV en la agricultura

La agricultura moderna o de precisión tiene más importancia sobre la tradicional, ya que siempre se busca aumentar la producción, aumentar la calidad del producto obtenido, reducir el impacto ambiental. Todo ello velando por la sostenibilidad en el medio ambiente.

Actualmente la mayoría de aplicaciones que se encuentran en agricultura están relacionadas con la teledetección (Andalucía, 2015), existiendo escasas experiencias con fitosanitarios. La teledetección remota es cada vez más utilizada para el desarrollo de estudios relacionados con la eco-fisiología vegetal, y las aplicaciones prácticas de la misma en agricultura y ciencias forestales, que ya que la información ofrecida puede ser relacionada con varios parámetros morfo-fisiológicos (biomasa, transpiración y fotosíntesis) *Jones and Vaughan, 2010*.

Por lo tanto, con la teledetección se puede obtener información del estado de una determinada plantación, pudiéndose determinar antes de ser detectado en el espectro visible.

Con las cámaras térmicas se obtiene información relevante acerca del estado de transpiración de una determinada plantación. Esto es, una situación de estrés hídrico hará que se cierren los estomas de la planta, y aumente la temperatura de esta, detectándolo con este tipo de sensores.

Por otro lado, en cuanto a la aplicación de fitosanitarios en la agricultura aún queda mucho por desarrollar, ya que todos los dispositivos actuales, disponen de una distribución tal que solo hace posible la aplicación de fitosanitarios de forma vertical. Por lo que serán adecuados para plantaciones donde la masa arbórea se distribuye de forma horizontal, como plantaciones de arroz, trigo, cebada etc...

No existiendo actualmente ningún dispositivo (Vázquez, 2003) (Budynas, y otros, Octava Ed. 2008) que utilice el aire del vehículo para la aplicación de fitosanitarios en plantaciones con follaje vertical. Es más, no existe ningún dispositivo que agilice el proceso de fumigación en jardines verticales, o masas arbóreas esbeltas.

9. AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Se define como agricultura de precisión como ‘intervención correcta, en el momento adecuado y en el lugar preciso lo que implica, aplicar dosis de fitosanitario adecuada en el momento y lugar adecuado (Andalucía., 2016). Por tanto, se empiezan a vislumbrar los primeros objetivos del documento, que serán requerimientos para el diseño del prototipo, siendo necesario aplicar el fitosanitario (y por tanto el flujo de aire que lo arrastre) en la dirección adecuada con la dosis conveniente.



Figura 15. BBC News. April 15, 2014. Se muestra una distribución típica de boquillas.

La agricultura de precisión nace de las siguientes premisas:

- La primera de ellas, según muestran los estudios no habrá alimentos para suministrar a toda la población, ya que para 2050 la población mundial alcanzará los 9700 millones frente a los 7300 actuales, en 2100 se tratará de 11200 millones de personas.
- La segunda cuestión está relacionada con el transporte de alimentos. Los alimentos que consumimos desde que son producidos hasta que son consumidos recorren de media 5000km, lo que consecuentemente conlleva.

- La tercera está relacionada con el impacto medioambiental, principalmente con el uso de pesticidas y fertilizantes, así como la pérdida de biodiversidad. (López Alba, y otros, 2013), (Boto Fidalgo, y otros, 1999).

En el olivar y en otros tipos de cultivos, un concepto importante a tener en cuenta, es la ‘tercera dimensión’ que no se tiene en cuenta en otros cultivos, esto es, los cultivos extensivos se definen en ‘dos dimensiones’ mientras que el olivar presenta una estructura de porte alto, perpendicular al suelo y discontinua entre ellas, con volúmenes de vegetación distintos, en contraposición al cultivo extensivo. Esto, por tanto, lleva consigo dificultades añadidas y es la discretización en la forma de aplicar el producto fitosanitario.

Otro pilar de la agricultura de precisión a tener en cuenta para este documento es la variabilidad intraparcularia, considerando la variabilidad en el manejo del cultivo. En este sentido, la complejidad estriba en identificar las zonas con variabilidad dentro de una misma parcela y consecuentemente tomar las decisiones necesarias. El por ello que se está avanzando en sistemas GPS (Global Positioning System) y SIG (Sistemas de Información Geográfica), incluyendo por tanto la teledetección. (Andalucía., 2016)

10.NECESIDAD Y PROBLEMA A SUPLIR

En las últimas décadas, la especie humana ha empezado a sentirse preocupado por diversas cuestiones relacionadas principalmente con los problemas de salud, como consecuencia del ambiente en el que vivimos. Muchos de estos problemas están relacionados con la aplicación de productos fitosanitarios y la fertilización en la agricultura.

Por otro lado, es por todos conocida la problemática medioambiental en la que nos enmarcamos y la que tendremos en años venideros. Como se ha mencionado anteriormente la población crecerá en los próximos años, llevando asociada una tendencia a intensificar los cultivos, siendo necesaria una racionalización de los insumos utilizados en esta.

Es por ello que se tendrá una clara tendencia a aumentar la eficiencia en las labores, optimizando los recursos, viniendo acompañada de una automatización de los procesos.

Así, el problema a cubrir será la aplicación de productos fitosanitarios de forma eficiente y autónoma. No solo se centra en el cultivo del olivar, sino que lo propuesto en este documento, se adecua mejor a plantaciones con distinta morfología, como plantaciones ornamentales, cultivos en invernadero o aquellos de difícil accesibilidad.

10.1. Descripción de la tarea a realizar

La aplicación consistirá en utilizar vehículos aéreos no tripulados para suplir algunas carencias actuales, aplicando el producto fitosanitario de forma controlada y eficiente.

10.2. Descripción de funcionamiento del vehículo

Posteriormente se analizarán los modos de vuelo más convenientes, pero para cubrir la necesidad planteada se requiere de modos de vuelo totalmente autónomos, con el sistema de pulverización sincronizado con el vehículo. Es decir, el accionamiento del sistema de pulverización debe de realizar de forma automática.

11.CONTROL

11.1. Control del vehículo

11.1.1. Manual

Como se ha comentado anteriormente existen varios modos de vuelo manual, cuyas principales diferencias vienen motivadas por el uso de diversos sensores, y consecuentemente por el protagonismo del piloto en el control del vehículo incluido. En las primeras pruebas del prototipo, se hará uso del GPS, para tener un vuelo estable, pero sin utilizar la programación de una ruta.

11.1.2. Automático

Utilizará todos los sensores, incluido el GPS con la previa programación de una ruta. Este modo de vuelo será el utilizado para la futura implementación del sistema al mercado laboral. Además, como trabajo futuro se propone desarrollar unos algoritmos que faciliten la distribución de las trayectorias en cultivos como la olivicultura, en la sección 22.7. OPTIMIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA, página: 198 se proponen diversas trayectorias a seguir por el vehículo. Ello se realizará de forma genérica, teniendo en cuenta una distribución uniforme de la parcela, pero es extensible a una distribución en parcelas reales.

11.1.3. Modos de vuelo

Existen distintos tipos de vehículos, por lo que existirán también distintos tipos de vuelo, dependiendo de las necesidades de cada vehículo, nosotros buscaremos un vuelo estable.

- El modo de vuelo acrobático está basado en que el piloto es el protagonista y la controladora apenas realiza control. Este no es el objetivo del presente documento y por lo tanto se obviará.
- El siguiente modo de vuelo, en orden de protagonismo del piloto, es en el cual, al no ejercer influencia en los controles el vehículo teóricamente adoptaría una posición estacionaria (teóricamente). Esta configuración no se usará, ya que si no

incorporamos GPS el vehículo se moverá a velocidad constante (no detectada por el resto de sensores).

- La versión mejorada de la anterior, es la que incluye GPS, que coordina los movimientos. El GPS se encargará de leer la posición actual para seguir manteniendo esa posición, ya que los sensores introducen errores que harán desplazar el vehículo con velocidad constante (no detectada por los acelerómetros). Este modo de vuelo será el que se emplee para realizar las primeras pruebas del prototipo, para posteriormente pasar al siguiente modo de vuelo descrito.
- El último modo de vuelo es aquel en el que se realiza un vuelo totalmente autónomo, sin la intervención del piloto durante la ejecución de este. Se realiza lógicamente mediante GPS, apoyado por otros sensores, como barómetro, para el despegue y aterrizaje. Tan solo se tendrá que programar una ruta a seguir y este la ejecutará desde el despegue hasta el aterrizaje. Esta es la más interesante si se quiere automatizar y disminuir los costes económicos del proceso. Además, es la única en la que el vehículo es totalmente autónomo, ya que en todas las anteriores se necesita intervención del operario.

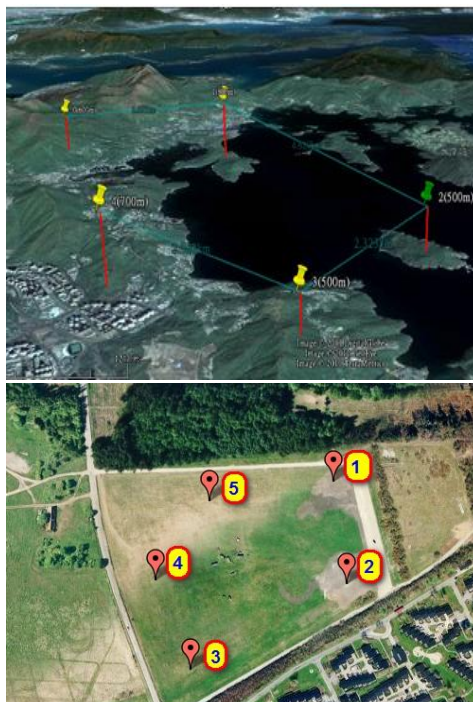


Figura 16. Ejemplos de rutas programadas para vuelos autónomos.

Existen otros vuelos intermedios en los que se bloquea algún eje o el vehículo sólo se mueve en una dirección permitida. Esto es conocido como control inteligente de orientación (Intelligent Orientation Control) donde se tienen varias posibilidades aplicables a nuestro caso

- Bloqueo del origen. Se define un centro de rotación del vehículo, esto será útil para que automáticamente el vehículo describa una circunferencia con centro el objeto a pulverizar.

- Bloqueo de la trayectoria. Se establece una única dirección a seguir por el vehículo, se podrá emplear si nuestro cultivo tiene direcciones predominantes.

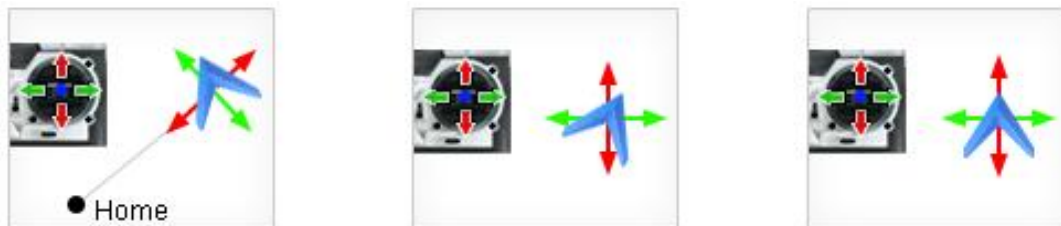


Figura 17. Bloqueo del origen, interesante para definir el centro de rotación en la plantación y realizar pruebas experimentales (izquierda), bloqueo de la trayectoria, interesante para actuar sobre camadas o hileras en cultivos de invernadero (centro) y modo convencional de control (derecha) (DJI).

11.2. Control de deflectores

11.2.1. Manual

Para verificar el funcionamiento del deflector, y de todo el conjunto, el deflector se accionará de forma manual, desde la emisora de tierra. Siendo el conexionado eléctrico sencillo, por lo que se evitan errores inducidos como consecuencia del ello. De esta forma se podrán probar las posiciones límite en las que el vuelo es estable, además de distintas geometrías y parámetros del deflector y vehículo sin crear una situación de riesgo.

11.2.2. Automático

Para su implementación en la agricultura, no tiene sentido realizar un control manual del sistema, ya que no se alcanzarían los objetivos para los que está previsto. Por lo que en versiones futuras se controlará de forma automática, sincronizado con la posición del vehículo o con otros sensores, como se verá más adelante, teniendo en cuenta al mismo tiempo la programación de la trayectoria del vehículo.

12. ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA

En la parte eléctrica - electrónica del UAV se diferencian los siguientes componentes:

- Receptor
- Motores
- Variadores de velocidad. ESC. Electronic Speed Controller.
- Controladora de vuelo.
- Antenas
- Baterías
- Elementos auxiliares.
 - FPV
 - Cámara de video
 - Emisor de video
 - OSD
- Sensores
 - Tipos de sensors
 - GPS
 - Acelerómetro
 - Barómetro
 - Compás / Magnetómetro
 - Influencia de los sensores
- Diagrama de conexión más sencillo
- Diagrama de conexión con elementos auxiliares

El objetivo del presente documento no es fabricar ninguno de estos componentes, ya que cada componente comprendería mucho más de un TFG. Por lo tanto, se parte de que ya en el mercado existe gran diversidad de componentes, por lo que se escogerán y se fabricará el dron con dichos elementos, centrándonos en la parte que nos atañe. Además, se podría comenzar realizando el programa completo que controla el vehículo, pero si analizamos el código implementado en la controladora, se compone de 16.464 líneas (caso de Multiwii 2.4) (libre). Además de la programación para el control de

sensores adicionales como GPS, (requiere de aproximadamente 1576 líneas de código), para la implementación de una pantalla LCD en el propio vehículo se requieren aproximadamente 2792 líneas de código. Además de los códigos anteriores que se implementan en la controladora existen otros elementos electrónicos que requieren de programación adicional, como velocidad o ESC. Por lo que, de esta forma, queda justificado la no programación de dichos elementos para este trabajo, siendo nuestra labor más sencilla.

A continuación, se procede a la descripción teórica desde un punto de vista práctico de los sensores y elementos utilizados, para que de esta forma se puedan escoger correctamente.

12.1. Elementos comunes

12.1.1. Antenas

La definición de antena, según IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) (Balanis, 2º Edición) es aquella parte de un sistema emisor o receptor, diseñada para emitir o recibir ondas electromagnéticas. Los parámetros más importantes para la caracterización de una antena desde el punto de vista eléctrico es la impedancia, la resistencia de radiación y el rendimiento.

En este punto no se analizará la teoría de antenas, ya que se extendería demasiado el documento, pero son necesario tener los conocimientos básicos de cómo es su funcionamiento y cuáles son sus principios, ya que durante los estudios de ingeniería mecánica no se profundiza sobre dicho tema. Es necesario hacer referencia, ya que son la base de la navegación aérea no tripulada, siendo necesario comprender la teoría para para elegir correctamente entre la gran variedad de componentes y tipos de dispositivos utilizados que existen en el mercado.

Para el estudio en profundidad de teoría de antenas se propone la bibliografía especializada:

-Campo eléctrico y magnético (Goñi, 1986) además de (Landau, y otros) y (NASA)

- Cálculo de antenas. (Balanis, 2º Edición)
- Antenas en frecuencia de 2.4 GHz (Büchi, 2014).

El análisis de las antenas se centrará tanto para el emisor y receptor del propio vehículo, como para el sistema de transmisión de vídeo, que resultará útil para monitorizar el movimiento del deflector durante un vuelo.

12.1.2. Tipos de antenas

Existen una gran variedad de antenas, en función de nuestras necesidades y preferencias.

Se analizarán las más importantes, pudiendo ser clasificadas como unidireccionales y omnidireccionales. Las primeras se utilizarán para largos vuelos en una dirección, al ser de largo alcance, mientras que las segundas se utilizarán para distancias medias-bajas, pero en todas las direcciones. Esto se explicará más en detalle, ya que es un punto importante, tanto el tipo de antena como su colocación y orientación, tanto en el vehículo como en la estación de tierra. Dependiendo principalmente de la extensión del cultivo y donde se sitúe la estación de tierra se escoge una antena u otra.

12.1.2.1. Antenas direccionales

Estas son empleadas en la estación de tierra, ya que no se puede utilizar una antena direccional de forma fija en el vehículo que permanentemente cambia de orientación.

Se encuentran diversas geometrías, pero las más importantes y testeadas son las siguientes.

- **Tipo panel, patch.** Son las más sencillas y constan de una placa plana de material conductor.

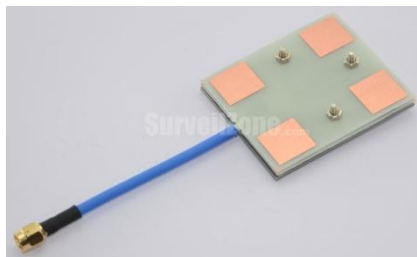


Figura 18. Antenna patch.

- **Tipo hélice, helical.** Constan de una hélice de cobre además de una placa plana circular o rectangular del mismo material.

Estas antenas, como se ha mencionado se utilizarán para grandes extensiones, donde se requieran de alcances de 1 a 10 km*, presentando el inconveniente de que solo se puede realizar el vuelo en la dirección en la que está orientada la antena.



Figura 19. Helical antenna. Polarización circular

12.1.2.2. Antenas omnidireccionales

- Las más importantes son las antenas de fuste vertical. Usualmente a estas antenas se les nombra como polarizadas. Nomenclatura que es errónea, ya que polarizadas son todas.

- La morfología más importante que se encuentra en el mercado actual son las denominadas cloverleaf u hoja de trébol. Tienen una geometría como la



Figura 20. Antenas de polarización circulares omnidireccionales. (Izquierda) antena de 700 MHz. (Derecha) antena de 5.8 GHz.

transmisión de video por los patrones de radiación que nos proporcionan, como se verá posteriormente.

**Además de lo anterior, el alcance logrado dependerá de la potencia del emisor y de las interferencias que puedan existir con otros elementos, además de las propias interferencias generadas en vehículos de pequeñas dimensiones, siendo esto último una dificultad añadida en el vehículo utilizado, en los cuales los distintos elementos que emiten o reciben radiación están unos muy cerca de los otros (por dimensiones del vehículo). Por ello el alcance llegar a oscilar entre unas decenas de metros hasta decenas de kilómetros.*

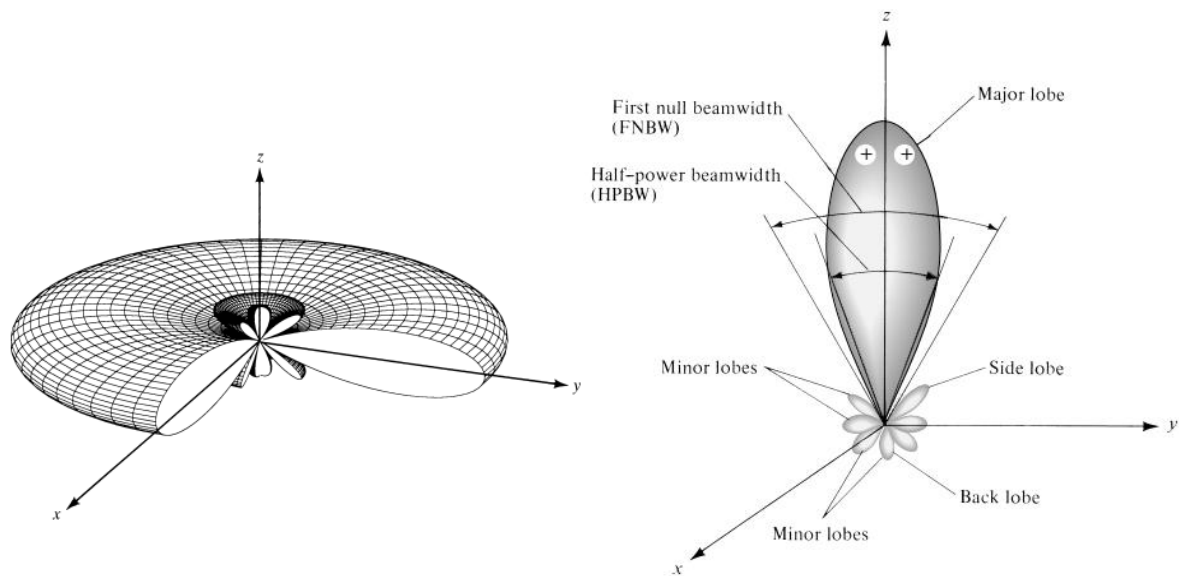
12.1.2.3. Patrón de radiación

Figura 21. Patrón antena omnidireccional (izquierda), patrón en una antena direccional (derecha)

Una antena no irradia con la misma intensidad en todas las direcciones del espacio, sino que depende de su geometría, dimensiones y forma de excitación. Por ello es importante el diagrama de radiación o patrones de radiación. Un patrón de radiación usualmente tiene las siguientes partes o lóbulos:

- **Lóbulo principal:** Volumen en el que se concentra la mayor parte de la potencia radiada por la antena. Puede existir uno o más de uno.
- **Lóbulos menores:** que a su vez se distinguen entre Lóbulos laterales y Lóbulo trasero situado a 180° del lóbulo principal.

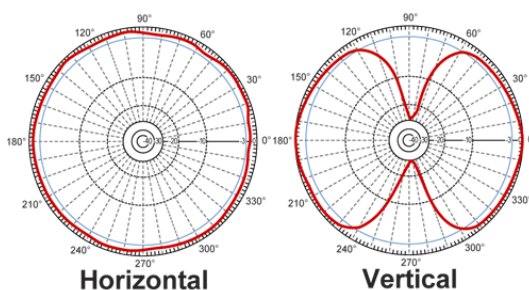


Figura 22. Patrón de radiación de las antenas hoja de trébol.

12.1.2.4. Ganancia

También se conoce por directividad (Goñi, 1986).

La ganancia se designa en belios (usualmente se utilizan decibelios, dB) e indica en una escala logarítmica una magnitud o cantidad (normalmente intensidad o potencia) relativa a un nivel de referencia, es decir, es una escalar que indica amplificación de una magnitud. Usualmente se encuentra en unidades dBi en lugar de dB, esto es porque está referido a un nivel de referencia isotrópico.

La ganancia representa la relación que existe entre la intensidad de radiación de una antena en la dirección en que es máxima y la intensidad que se produciría en la misma antena si se repartiese su radiación por igual en todas las direcciones del espacio.

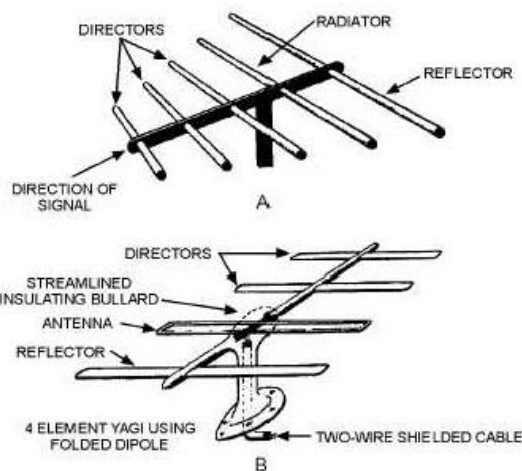


Figura 23. Antena yagi polarización horizontal, al aumentar el número de elementos aumentará la ganancia.

12.1.2.5. Ancho de banda

Se define como banda de frecuencias en la que puede funcionar una antena. Es de destacar la capacidad de penetración de las ondas, las ondas con menor frecuencia son capaces de atravesar mejor el medio, por lo que, si se interfiere un objeto sólido entre un emisor y un receptor se verá mucho más afectada la frecuencia de 5.8 GHz comparada con la 2.4 GHz. Y si no se interfiere ningún objeto, sino que simplemente se transmite a través de un medio (en nuestro caso aire) conseguiremos más alcance en la frecuencia más baja, aunque con mayor facilidad de que la onda sea interferida por otras.

12.1.2.6. Polarización

La polarización se define como la figura que traza en función del tiempo, para una dirección determinada, el extremo del vector campo emitido o recibido, en un punto del

espacio (Balanis, 2º Edición). La polarización indica la orientación del campo que emite o recibe una antena. Esta puede ser:

- **Lineal:** si el vector de campo eléctrico emitido o recibido es función del tiempo y está contenido en un plano. Puede ser polarización vertical u horizontal.
- **Circular:** si la trayectoria seguida por el campo eléctrico es una circunferencia. En la circular y elíptica puede ser polarización a derechas o a izquierdas según el sentido de giro del campo eléctrico.
- **Elíptica:** es una circular, pero con distinta amplitud uno de los campos.

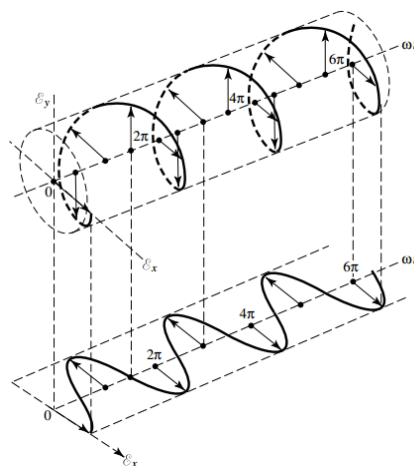


Figura 24. Polarización lineal horizontal

Este concepto es importante, ya que hará seleccionar antenas con la misma polarización para el vehículo y la estación de tierra.

12.1.3. Orientación de antenas

La orientación de las antenas, cuando se trata de un vehículo el cual está construido principalmente con material conductor, como es el aluminio y la fibra de carbono, es de vital importancia. Dependiendo del tipo de antena se utilizará una disposición u otra, por ejemplo para la transmisión de video se emplean omnidireccionales cloverleaf y la mejor disposición será vertical invertida. Sería indiferente que los lóbulos se orientaran en la parte superior o inferior, si no existiera el vehículo y materiales conductores que interfieran en la transmisión directa.

Por lo anterior, se dispone la antena con los lóbulos en la parte inferior del vehículo Figura 25, para que no interfiera el propio vehículo con la señal emitida, además se separará (en la medida de lo posible) del resto de circuitos eléctricos del vehículo.

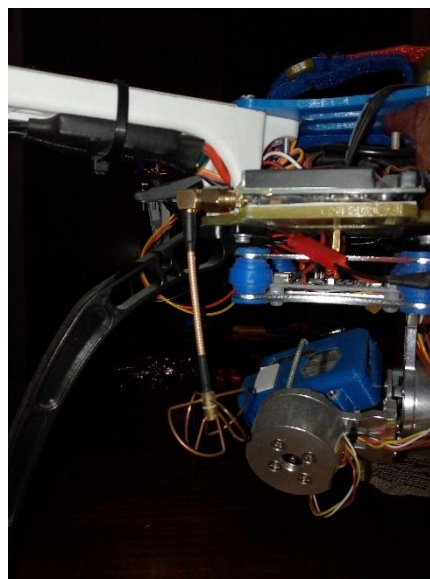


Figura 25. Disposición de antena cloverleaf, invertida respecto del vehículo.

Para prevenir interferencias entre elementos (como consecuencia de estar próximo) existen otras soluciones, instalar núcleos de ferrita en los cables que porten señal, esto se comentará en el apartado correspondiente.

12.1.4. Justificación de la selección de antenas

A la vista de la teoría explicada anteriormente, se tienen los conocimientos para justificar la selección de antenas. Como se ha mencionado se busca una solución flexible, válida, y que se adecue a nuestras necesidades, sin ser necesario que el operario realice cambios previos al vuelo. Por ello se selecciona antenas omnidireccionales para la transmisión de datos, (no se busca largos alcances (del orden de kilómetros), sino que se busca no perder la comunicación independientemente de donde nos situemos en la parcela y la orientación del vehículo)

Es por ello que se seleccionan antenas de hoja de trébol para la transmisión de datos en forma de video, antenas de fuste vertical para la transmisión de datos de vuelo para control de forma autónoma y para el control manual.

En cuanto a las frecuencias seleccionadas serán 2.4 GHz para la transmisión del control manual, 2.4 GHz para la transmisión de datos de forma autónoma y 5.8 GHz para la transmisión de datos y telemetría redundante. Las frecuencias anteriores se deben escoger de forma que estén separadas entre sí, (si actúan al mismo tiempo), de modo que no se tengan interferencias en el propio vehículo.

12.2. Baterías

El vehículo, con el cual se trabaja posee una planta de potencia movida por energía eléctrica, teniendo unas ventajas e inconvenientes obvias.

La justificación de las baterías utilizadas se realizará en las siguientes páginas, para ello previamente habrá que entender su funcionamiento y sus parámetros, justificando también la utilización de distintas baterías independientes para diferentes dispositivos, evitando las interferencias y corrientes parásitas que inducen los motores y reguladores en la transmisión de video si están en contacto físico mediante la batería (utilización de una misma batería para el sistema de transmisión de video y funcionamiento del

vehículo). De esta forma, se realiza un diagrama de conexonado para el vehículo y otro para el sistema de video totalmente independiente para el sistema de video, respectivamente secciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y REF _Ref459758970 \n \h **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

12.2.1. Tipos

Actualmente existe diversidad de baterías, surgiendo recientemente, las utilizadas en todas los dispositivos, nos referimos a la tecnología LiPo. Al igual que en la clasificación de los motores, existe confusión o ambigüedad en cuanto a nomenclatura de algunas de estas. Ello viene motivado, porque en las baterías se tiene un gran número de compuestos químicos, pero en la denominación de estas se simplifica, como es el caso de baterías Litio-Ion y Litio Polímero.

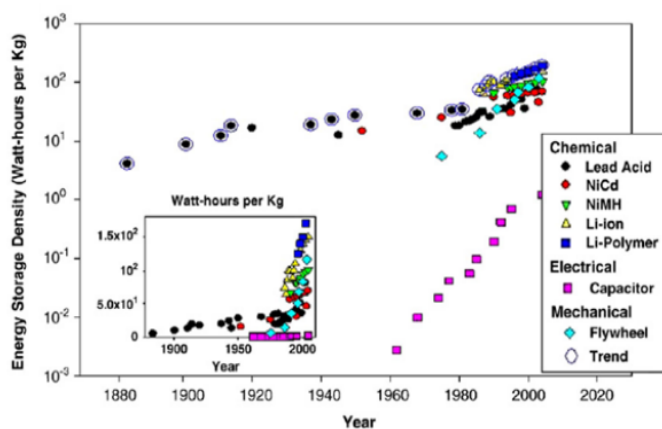


Figura 26. Evolución de la densidad de energía almacenada a lo largo de los años. National University of Singapore, division of Engineering and Technology. Jeffrey Funk

Las más importantes por sus características principalmente de relación capacidad- peso son Li-Ion, LiFePO₄(Litio Ferro-Fosfato o Litio Fosfato de Hierro) y LiPo. (Litio Polímero) (forum).

12.2.2. Litio Polímero

Entre sus principales inconvenientes encontramos su

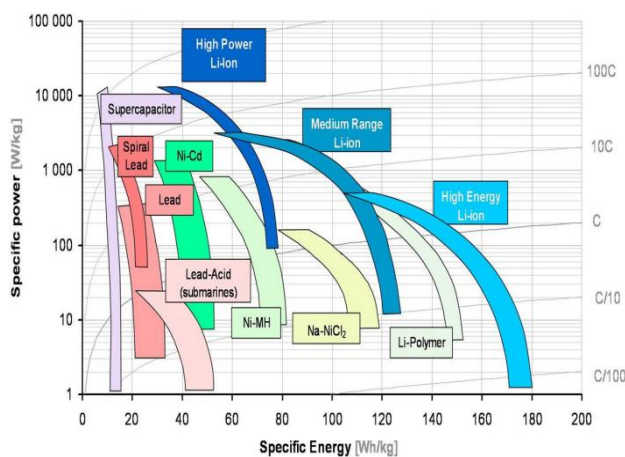


Figura 27 Capacidad específica frente a potencia específica según el tipo de batería. A la derecha se muestra la escala de velocidad de descarga.

peligrosidad si no se realiza un control y supervisión de estas, en todas las fases del vuelo, incluida las anteriores y posteriores. Esto es, principalmente no exceder las capacidades de carga y descarga, así como no exceder el voltaje mínimo que se establece en 3.5 V (puede variar ligeramente según fabricante) además de no sufrir cortocircuitos.

La capacidad vendrá dada por los amperios hora de esta. Por lo tanto, como en todas baterías, a mayor capacidad, mayor masa y volumen. En vehículos aéreos eléctricos pueden oscilar desde 150 mAh hasta 100 Ah.

12.2.2.1. Carga

La carga es otra fase crítica en las baterías. Estas requieren ser balanceadas cuando el voltaje de las celdas difiera unas de otras. Por ello, los cargadores de baterías LiPo, además de ser una fuente de alimentación disponen en su interior de un balanceador de celdas, disipando su energía en resistencias.

12.2.2.2. Descarga

En la Figura 28 se muestra el voltaje a lo largo de una descarga genérica de una batería Litio Polímero, se aprecia como el voltaje no es proporcional por lo que se debe tener en cuenta a la hora de realizar las operaciones de vuelo, ya que el voltaje cuando está próximo a la descarga cae rápidamente.

Por ello tampoco se puede establecer un número fijo para el voltaje de la batería, en ningún caso se bajará de 3.5 V (en una descarga lenta). Como se aprecia en la Figura 28, a una velocidad de descarga mayor el voltaje donde se encuentra la última caída brusca de voltaje, será mayor.

En nuestro caso (batería 3S) se programa el vehículo para que a 11 V comience a dar un aviso luminoso para que al piloto (caso de vuelo manual) tenga suficiente tiempo para aterrizar en un lugar adecuado. Para un voltaje de 10.7 el vehículo descenderá automáticamente hasta aterrizar, corriendo por tanto el riesgo de aterrizar en algún sitio no deseado, poniendo en riesgo a las personas o al propio vehículo.

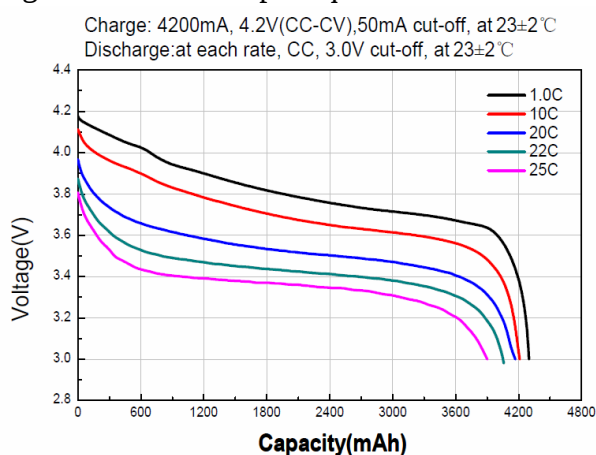


Figura 28. Curva de descarga. DIY Drones.

12.2.2.2.1. Velocidad de descarga

Para un multirrotor de 4 hélices, como el que se está trabajando la potencia es de 180W por motor (para la hélice 12x4.5) (Sección 12.5.4.1.1, Curvas características del motor, página 61), por lo que la máxima potencia del vehículo es de 720 W=0.98 CV. Y la batería que se ha seleccionado es de 20C a 5 Ah, por lo que la intensidad máxima que puede entregar es 100 A. que multiplicado por el voltaje mínimo en el que trabajan las baterías (el más desfavorable, 3.5V por celda) $100 \times 10.5 = 1050$ W. Por lo que como 1050 W > 720 W dicha batería es válida para suministrar la máxima potencia.

Siempre se recomienda tener un margen mayor al 10% entre ambas potencias, en cualquier caso, es suficiente ya que a máxima potencia raramente se trabaja. Se comprueba que el vehículo despegue y mantenga un vuelo estacionario al 54% de potencia total (dependiendo de la carga de pago), por lo que la potencia aproximada en estas condiciones es de 388,8 W.

El diagrama de conexión de las celdas es serie. Cada celda (puede variar ligeramente según el fabricante) tiene un voltaje nominal de 3.7 V y un voltaje máximo de 4.2 V, por lo tanto, se acoplan tantas celdas en serie para tener el voltaje deseado, si se quiere mayor

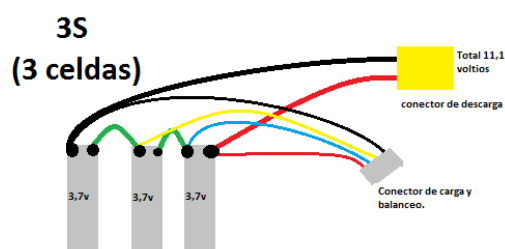


Figura 29. Ejemplo de conexionado de las celdas en batería 3S1P.

capacidad se pondrán en paralelo. No se acoplan en paralelo ya que la capacidad de las celdas independientes es suficiente para realizar el vuelo. Esto se encontrará en las especificaciones técnicas de la batería como S-P, es decir, por ejemplo, en nuestro caso utilizaremos baterías 3S1P, significando que tendremos tres celdas en serie y una en paralelo, teniendo, por tanto, voltaje máximo a plena carga de 12.6V.

12.3. FPV. First Person View

Por sus siglas en inglés *First Person View*, es decir, vuelo en primera persona. Su objetivo es transmitir señal de video desde el vehículo hasta la estación de tierra.

Normalmente, este sistema se emplea para permitir al piloto guiarse sin necesidad de tener contacto visual directo con el vehículo, siendo por tanto BVLOS (Beyond Visual Line of Sight). En nuestro caso se empleará para en las primeras pruebas experimentales, conocer la posición del deflector, y estudiar el funcionamiento de este durante las primeras operaciones de aplicación de fitosanitarios.

Se compone de:

- Transmisor de video
- Cámara de video
- OSD (On Screen Display)
- Receptor de video.
- Monitor o gafas virtuales.
- Seguidor de vehículo

Siendo importante la elección de la antena tanto para el emisor como para el receptor, además de la potencia del emisor.

A continuación, se describirán los elementos que lo componen en el apartado correspondiente.

12.4. En UAV

12.4.1. Receptor

Elemento que permite la recepción de datos desde la estación de tierra. Aunque se pueden realizar vuelos totalmente autónomos, por motivos de seguridad en todos los vehículos es necesario que el piloto pueda tomar el control en un determinado momento del vehículo (actualmente lo exige la normativa).

Uno de los problemas que pueden surgir durante el vuelo es la pérdida de recepción de la señal, no siendo un problema, ya que el vehículo autónomo no realizaría ninguna acción, permaneciendo estacionario en la misma posición que tenía en el

momento de la pérdida de señal. O si lo tenemos correctamente configurado, la acción que ejecutará es la vuelta a casa (go to home) o punto de despegue. (ver principal problema de interferencias entre señales, sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, página **¡Error! Marcador no definido.**)

12.4.2. Motores

Actualmente y por los motivos que se muestran más abajo se utilizan motores sin escobillas asíncronos trifásicos de imanes permanentes. Son conocidos como Brushless, los utilizados no disponen de encóder, ya que el mecanismo por el cual se conoce la posición del rotor es distinto. Por lo tanto, el único contacto mecánico entre el rotor y estator son rodamientos axiales.

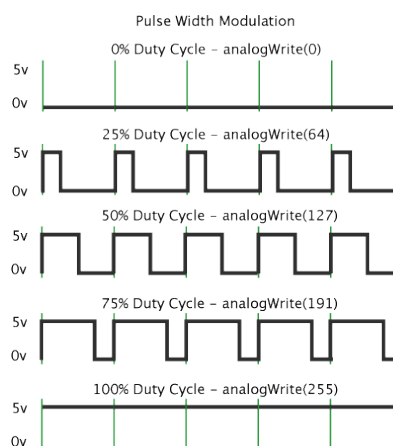


Figura 30. Señal PWM.

Estos motores se caracterizan por tener un mayor rendimiento, ya que, en contraposición a los motores con escobillas, en los motores convencionales sí se produce rozamiento entre el rotor y estator por medio de dicho elemento. Además, en estos últimos, se requiere de mantenimiento en las escobillas, produciendo más vibraciones y ruidos, además de la suciedad que desprende su desgaste.

El principal inconveniente es la dificultad de controlar estos motores. Esta dificultad radica en activar las diferentes bobinas (de una fase) tras otra, pero que con el avance de la electrónica se palia esta dificultad, por ende, la tendencia de estos últimos años es a utilizar dichos motores.

A continuación, se mostrará una clasificación basada principalmente en conocimientos propios, ya que apenas hay bibliografía, y la información es confusa, al surgir en los últimos años diversas geometrías y disposiciones distintas a las convencionales.

Como en el caso de las antenas, se deja propuesta bibliografía para el lector que desee profundizar en dicho tema. Para un análisis exhaustivo se recomienda la consulta

de (Krishnan, 2010), mientras que para conceptos generales de las máquinas eléctricas puede ser útil (Fraile Mora, 2008) y (Chapman).

En primera instancia tendremos los motores conocidos como BLDC (Brushless Direct Current). En los que como su definición indica son motores de corriente continua, pero requieren de un inversor que hace las veces de ESC, que lo transforma a corriente alterna antes de entrar en el motor. Por lo tanto, en sí son motores de corriente alterna, pero no implica esto que su señal sea sinodal. Es decir, funcionan con señales que se invierten periódicamente pero que pueden ser ondas cuadradas o rectangulares. De hecho, estas ondas son usualmente rectangulares, denominadas PWM (Pulse Width Modulation). Esto es, el controlador (ESC) es digital, funciona con 0 o 1, por lo tanto, para tener una señal ‘aproximada a analógica’, (que equivale a decir que el motor puede girar a un régimen continuo o una distribución continua de velocidades), ‘imita’ el analógico con la modulación del ancho de pulso (ello en las tres fases).

Es aquí cuando surgen dos principales vertientes;

- La primera, en la que la información de la posición le llega al controlador desde un encóder situado en el rotor del motor. Es decir, el sistema está retroalimentado, en función del estado de aceleración y el régimen de giro. Estos motores se conocen como ‘sensored’, (sensorizados). Esta familia no se emplea aquí, ya que estos normalmente se utilizan para aplicaciones de vehículos terrestres, al ofrecer mayor precisión el control de su movimiento.
- Los utilizados son motores outrunner, en los que la disposición geométrica cambia. El rotor se sitúa en la parte exterior, y en la parte interior se encuentra anclado el estator. El rotor contiene los imanes permanentes y el estator el conjunto de bobinas en un núcleo de hierro.

Las ventajas de los motores con el rotor externo son las siguientes.

- Mayor refrigeración. Al tener la parte móvil en el exterior el aire es capaz de penetrar en todas las partes del motor, evitando sobrecalentamientos, por lo tanto, sus

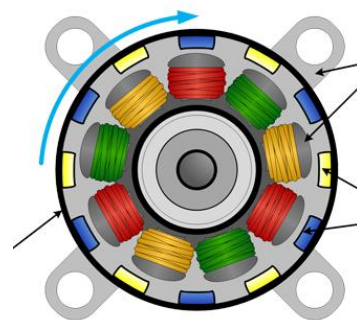


Figura 31. Outrunner.

prestaciones son mayores, ya que la principal limitación de los motores eléctricos es la temperatura que pueden alcanzar.

- Las fuerzas de inercia harán que los imanes permanezcan en su posición, es decir, los imanes (situados en el rotor) tenderán a adoptar la forma de la campana exterior. Esto es recomendable para motores que trabajan a altas velocidades.
- Por lo general (las configuraciones de motores existentes para dicho uso) presentan menor inercia, ya que la masa del bobinado generalmente es mayor que la de los imanes, por lo tanto, cuanto menor sea la masa en movimiento se tendrá una respuesta más rápida. Recomendado en multirrotores como el empleado, donde se requiere de respuestas rápidas para corregir la trayectoria y conseguir un vuelo estable.
- La construcción de dichos motores hace que estos tengan una proporción menos esbelta, es decir, los motores con rotor interno son por lo general más esbeltos, por lo que, donde se genera el par (exterior de las bobinas) tendrá un diámetro menor, siendo también menor el par.

Dichos motores además presentan inconvenientes, que en nuestro estudio no nos incumben, como el hecho de no estar cubierto el motor, haciéndolo más propenso a acumular suciedad si este se encontrara en un ambiente industrial. Además, para la mayoría de las aplicaciones, soportar un motor outrunner es más complicado, al tener contacto directo con el rotor, este último inconveniente se puede solventar añadiendo una bancada exterior, pero se reduciría la refrigeración de dicho motor.

Como se menciona estos no disponen de sensores sobre el motor (sensorless), pero será el variador de velocidad el encargado de leer lo que se denomina ‘back EMF (Counter-electromotive force)’ (a veces también notado como BWMF). Como su nombre indica el BEMF es el voltaje que aparece en la dirección opuesta a la corriente, como resultado del movimiento del motor, es decir, este es el principio de operación de los generadores. Este voltaje está directamente relacionado con la velocidad de giro del motor.

Los variadores de velocidad que no disponen la conexión para los sensores pueden ser utilizados con motores que tengan o no sensores internos.

Otra nomenclatura usualmente utilizada por los fabricantes es PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) o simplemente PMS, que como su nombre indica son motores con imanes permanentes, por lo que no son de inducción, (lo cual no aporta nada nuevo, ya que todos los motores tratados son de imanes permanentes). Y estos a su vez se pueden clasificar en función del flujo del campo magnético como,

- flujo axial
- flujo radial
- flujo transversal

siendo totalmente distintos (Krishnan, 2010).

En los motores un parámetro importante son los KV. Este parámetro es una medida de la variación del número de revoluciones en función de los voltios de entrada al motor. Es decir, los motores están diseñados para un voltaje determinado, los utilizados aquí funcionan a un máximo de 3S, es decir 12.6V (pudiendo trabajar puntualmente a más si se desea). Así dependiendo de los KV de determinado motor, se multiplicará dicho valor por el voltaje que se tiene, obteniendo el número de revoluciones a las que gira el motor sin carga. Dichos motores puntualmente pueden trabajar a más voltaje, el único problema es el calentamiento de estos, y el deterioro del campo magnético a altas temperaturas, pero si se tiene una muy buena refrigeración se puede contemplar esta posibilidad.

Si se desea profundizar en el conocimiento de las ondas que mueven los motores utilizados, además de la explicación por la cual se invierte el giro de estos al intercambiar dos fases, se recomienda la visita al enlace (Scheme) y (Theory).

12.4.3. ESC. Electronic Speed Controller

Dispositivo cuya función es controlar la velocidad de giro del motor, es la parte electrónica más compleja tras la controladora de vuelo. Está íntimamente relacionado con el motor, y por ende las características físicas de la onda de salida dependerá del motor utilizado. Este dispositivo se encarga de transformar la corriente continua de las baterías en corriente alterna



Figura 32. Controlador utilizado. 12,5V DC. Burst: 40A

trifásica de los motores.

Se encargará de

secuenciar la activación y desactivación de las bobinas en función del giro del motor. Es decir, cambia la polaridad de las bobinas y por lo tanto su campo magnético. Además,

si la carga del motor se incrementa, el ESC incrementará la corriente para crear un campo magnético más fuerte e intentar seguir el régimen de giro pedido.

Es importante destacar la frecuencia a la que trabaja y la máxima a la que puede trabajar, que estará íntimamente relacionado con la velocidad máxima de giro del motor. Variadores con mayor frecuencia obtendrán tiempo de reacción mucho más cortos, útil en multirrotores, ya que se necesita una velocidad de respuesta rápida en cada uno de los motores, y por tanto del ESC. La frecuencia del PWM que son capaces de leer será para los más rápidos (Oneshot 125) de 125-250 μ s, mientras que los ESC convencionales emplean 1-2 ms. Pero en nuestro caso será suficiente con los segundos, ya que al tratarse de un vuelo estacionario no se requiere de los primeros. Por ello se seleccionará unos ESC Turnigy plush (Turnigy)



Figura 33. Controlador Sevcon Gen 4 AC controller. Size 4, 116V DC. Burst: 420A (10s)

12.4.4. Controladora de vuelo

Es el cerebro del vehículo aéreo. En ella se integra un microcontrolador, usualmente de la categoría de 8 o 16 bit de Atmel. Además de incorporar diversos sensores integrados, entre los que se enumeran los siguientes:

- Barómetro
- Acelerómetro.

- Giróscopo.
- Altímetro
- Ultrasonidos (solo algunas plataformas)

Su función es, mediante la señal recibida desde los distintos sensores coordinar los motores y el movimiento del dron de forma que sea estable.

Existen numerosas plataformas ya construidas y testeadas, que usualmente, por su precio y sencillez serán las que se utilicen. Hay diversas marcas comerciales tanto para ala fija como alas móviles.

Pero el mayor protagonismo es el de las plataformas open-source. En todas ellas existe una alta componente de programación y caracterización de nuestro vehículo, ya que no son intuitivas y muchas veces no existen versiones finales o testeadas. Es por ello que desde el punto de vista de investigación son las más adecuadas, ya que permiten controlar un gran número de parámetros, que en las plataformas comerciales se omiten.

Existe una lista casi innumerable de plataformas a utilizar, a continuación, se mencionan las más importantes.

Placa	Software	Código abierto
CC3D	Openpilot / Cleanfly	✓
Naze 32	Cleanfly / Baseflight / Betaflight	✓
Multiwii	MultiWiiConf / MultiWiiGUI	✓
Ardupilot	APM Planner	✓
kk	No disponible	✓
DJI	DJI Multirotor / DJI Ground Station	
Autopilot	Mission Planner	
3DR Pixhawk	U g CS One Universal Ground Control	
Pixhawk	Mission Planner / U g CS One Universal Ground Control	✓

Tabla 1. Principales plataformas de vuelo.

A la vista de la tabla anterior se escoge la mostrada en sección 12.5.4.4 Controladora de vuelo, página 67.

12.4.5. Elementos auxiliares

12.4.5.1. FPV

12.4.5.1.1. Emisor de video

Como su nombre indica, su función es transmitir video (e información adicional) desde el vehículo hasta la estación de tierra, también se dispone de transmisión de sonido, la cual no se emplea.

A la hora de seleccionar entre los distintos transmisores hay que tener en cuenta las consideraciones que se muestran.

- La primera consideración es que se recomienda que la frecuencia a la que emite sea muy distinta de la que emite en cualquier otro dispositivo empleado. Es decir, dentro del rango de 2.4 GHz, la frecuencia variará ligeramente estando sincronizados perfectamente, sin interferencias (teóricamente), pero la realidad es que si ambos emisores fueran a 2.4GHz se producirían interferencias, siendo imposible controlar el vehículo.

Es por ello que se intenta utilizar frecuencias separadas entre los distintos dispositivos. En el mercado actual se encuentran dispositivos que funcionan a 900 MHz, 2.4 GHz y 5.8 GHz, en nuestro caso se emplea 5.8 GHz para la transmisión de vídeo, ya que la frecuencia de 900 MHz tiene un mayor alcance, pero también existe un riesgo mayor de interferencias, al estar dentro del rango de frecuencias de la telefonía móvil (450-2100 MHz). Además, el uso de esta frecuencia en España está prohibido.

- Además de la frecuencia seleccionada, otro parámetro importante es la potencia del emisor. Existe un amplio rango de potencias, siendo obvio que, a mayor potencia, mayor alcance. Existen desde 15 mW hasta 1,5 W, los primeros se utilizan para pequeños vehículos de interiores o indoor, y los últimos para cubrir grandes distancias, teniendo unas dimensiones y masa mayores, además de ser necesario refrigerarlos.

Por tanto, en una situación intermedia, encontramos los empleados (600 mW), que permiten cubrir distancias de aproximadamente 1,5 km en buenas condiciones* (ver sección 12.1.1 Antenas, página 36 e interferencias en sección 12.1.3 Orientación de antenas, página 41).

*Por buenas condiciones se entiende atmósfera despejada, libre de objetos y una correcta situación de la antena tanto en el vehículo como en tierra.

12.4.5.1.2. Cámara de video

Esta cámara de video se refiere a la empleada para la transmisión de video.

Se le exige que sea liviana, y que como el video no se transmitir en alta resolución (700TVL) es absurdo filmar en una cámara con alta resolución (se emplea tipo PAL). Normalmente se usan cámaras de sistemas de vigilancia, ya que tienen un amplio campo de visión (FOV).



Figura 34. SONY Super HAD CCD 600TVL.

En el caso que nos concierne, no se emplea el sistema OSD (On Screen Display), ya que no está justificado su uso. La frase anterior se menciona como consecuencia de que siempre que se utiliza FPV la posibilidad de instalar telemetría es mediante OSD. Pero en nuestro caso, tanto si se realiza vuelo autónomo, como si este es manual, se tiene una telemetría adicional proporcionada por el Datalink y la Ground Station de DJI. Que nos proporciona información acerca de mapa



Figura 35. Ejemplo de relojes en telemetría. (DJI)

3d en tiempo real, monitorización en tiempo real del vuelo, simulación previa al vuelo, despegue con una tecla, vuelta a casa con una tecla, trayecto con 16 Waypoints, rutas preprogramadas, herramientas de fotogrametría... etc.

12.4.6. Sensores**12.4.6.1. Tipos de sensores****12.4.6.1.1. GPS**

En este punto se analizan los distintos sistemas de posicionamiento, ya que será necesario saber qué ventajas e inconvenientes nos aporta cada uno de ellos.

Se define como sistema de posicionamiento global, Global Positioning System.

Con el DGPS (Differential Global Positioning System) con el que se consiguen precisiones inferiores a de 30 a 50 cm al tener otro GPS que nos corrige la medida del GPS del vehículo.

Existen otras alternativas como el RTK (Real Time Kinematic) o GPS cinemático donde se alcanza precisiones a nivel de centímetros (1 y 5 cm). Dicho sistema está basado en la medición del desfase entre la transmisión y la recepción de una señal y en la necesidad de captar al menos 5 satélites. Actualmente no está muy generalizado su uso (Andalucía., 2016).

Todos los errores comentados anteriormente para los distintos sistemas se tratan de forma absoluta, destacar que el error relativo es mucho menor, de forma que en un tiempo inferior a 5 minutos un receptor con posicionamiento absoluto económico proporciona errores relativos inferiores al medio metro.

12.4.6.1.2. Acelerómetro + Giróscopo

Se tratan de forma conjunta que ya la mayoría de las veces se integran en una misma placa. Los hay externos como el MPU 6050, el cual integra giróscopo y acelerómetro en los tres ejes. Se destaca este módulo ya que se utilizará en el primer sistema de deflector. Nos será útil para determinar la posición en la que se encuentra el deflector en determinado momento para poder así corregirla. La mayoría de las veces se encuentra integrado en las controladoras de vuelo. El giróscopo nos dará unidades de $\frac{\text{grados}}{\text{s}}$, el acelerómetro en g o $\frac{m}{s^2}$.

**Figura 36. GPS****Figura 37. MPU 6050 (20 x 15 mm)**

12.5. Estación de tierra

12.5.1. Emisora

Dispositivo utilizado para controlar el vehículo mediante control remoto. Es una interfaz con el piloto, y se utiliza en control manual del vehículo. En nuestro caso usará en las primeras pruebas del prototipo.

El principal problema, y que aún hace a los RPAS puedan tener problemas son las interferencias estas ocurren cuando el receptor recibe la señal de otro dispositivo no contemplado. Esto, teóricamente se evita, ya que cuando se fabrica un UAV la emisora se enlaza (bind) con su receptor, de forma que una vez que se enlaza el receptor se reconfigura automáticamente para recibir una frecuencia determinada. Al igual ocurre con emisores – receptores de video, que usualmente trabajan a 5.8 GHz, adaptándose el rango de frecuencias del transmisor de video de 5.705 - 5.945 GHz.

12.5.1.1. Canales

Un canal (ch) se define como una función que puede controlar el piloto de forma proporcional, como se analizó en sección 7.1 Movimientos de la aeronave, página 25 el número de canales mínimo para controlar un dron UAV es 4 (propulsión, cabeceo, alabeo y guiñada).

Además, se requieren canales extra, ya que además de los cuatro movimientos anteriores usualmente se necesita el control de diversos dispositivos y funciones. Como por ejemplo el piloto automático, modos de vuelo, movimientos de diversos servos, vuelta a casa, deflectores, etc. (Figura 60) Siendo algunos de ellos de carácter digital (como el pin U), mientras que otros son proporcionales (X1 y X2). En las funciones proporcionales auxiliar anteriores será donde se conecten los deflectores. El deflector tipo I requerirá de 2 canales adicionales proporcionales, para controlar el giro en dos ejes. Mientras que el deflector tipo II requerirá de un solo canal proporcional para el control manual durante las pruebas.

12.5.1.2. Tipología

La tipología más extendida en Europa es el denominado *Modo II*, mientras que en América se suele utilizar el *Modo I*. Esto solo indica la posición de los stick, en el *modo I* el throttle está en la derecha mientras que el segundo está en la izquierda.

Todos los stick poseen muelle para retornar a la posición de origen, excepto el throttle, que dependiendo del fabricante y modelo lo puede implementar o no. Es decir, si no se tiene muelle de retroceso, al soltar el acelerador este permanecerá en el mismo lugar, mientras que el resto de controles al soltarlos recuperarán a una posición centrada.

Por otro lado, las emisoras disponen de un software o firmware, que puede ser actualizado, modificado o cambiado. Normalmente la programación de estas se realiza con un programador AVR, ya que el procesador que integran las emisoras es de la serie Atmega. Pero los fabricantes muchas veces no proporcionan acceso a esta comunicación, para que no se puedan hacer estas modificaciones, pero internamente, sí están los pines para poder realizar la programación. Así, una vez que ya tenemos el puerto para conectarla al AVR tan solo se ha de conectar el conjunto mediante USB a un ordenador. Después se descargarán los drivers y se formatea la emisora para posteriormente instalarle otra versión que nos interese más para nuestro uso. En nuestro caso, la emisora no disponía de puerto externo y fue necesario instalarle un conector externo para realizar la reprogramación. Con la reprogramación de la emisora se consigue tener un mejor control del vehículo, además de los deflectores, ya que se definen parámetros como límites de actuación del canal, velocidades de actuación, mezclas entre canales, etc.



Figura 38. Puerto para reprogramación de emisora.

12.5.1.3. Alimentación emisora

La alimentación de la emisora se realiza con baterías LiPo, consiguiendo grandes autonomías ya que el consumo del transmisor es bajo. La potencia del transmisor se puede estimar teniendo en cuenta que una batería de 2650 mAh de 3s (11.7 V) tiene una duración aproximada de 6 horas cuando el transmisor está funcionando.

$$2,650 \text{ Ah} \cdot 11.7 \text{ V} = 31 \text{ Wh}$$

$$\frac{31 \text{ Wh}}{6 \text{ h}} = 5,2 \text{ W}$$

La precaución a tomar, como ya se ha comentado, siempre que se trabaja con esta tecnología en las el balanceo y la bajada de voltaje. Para evitarlo, se programa la emisora para activar una alarma acústica y luminosa cuando el voltaje de las celdas sea inferior a 3.6 V.

Todos los transmisores incluyen ‘trim’ que calibran los stick y potenciómetros, es decir, pequeños pulsadores que electrónicamente modifican la posición de reposo o neutra de estos y no se produzca movientos cuando no son accionados. Esto, además de utilizarlos en el control del vehículo también serán utilizados para regular la posición de reposo de los deflectores. (Sección 12.5.1.4 Programación, página 58).

12.5.1.4. Programación de emisora

La mayor parte de las emisoras actuales son programables, en las cuales los parámetros más importantes a programar son las mezclas o mixes. Esto es, que al accionar un stick o ejecutar una acción con un control se acciona automáticamente otra. Como su nombre indica, se permite hacer mezclas entre canales, para que automáticamente al ejecutar un movimiento se modifiquen los parámetros de otro movimiento. Y este segundo movimiento ejecutado puede describir una curva (también programable) o simplemente invertir el sentido de giro. Hecho útil y necesario para invertir el movimiento en los servos que controlan los flaps en un ala fija para su movimiento de alabeo, o invertir el sentido de giro del servomotor en el deflector. En nuestro caso las mezclas se utilizan para realizar programaciones experimentales, como al accionar el throttle, el deflector tipo II se accione de forma progresiva, de forma que se compense el aumento de sustentación (como consecuencia de aplicar más potencia a todos los motores) con una deflexión mayor del aire, (esto se realiza para pruebas experimentales del prototipo).

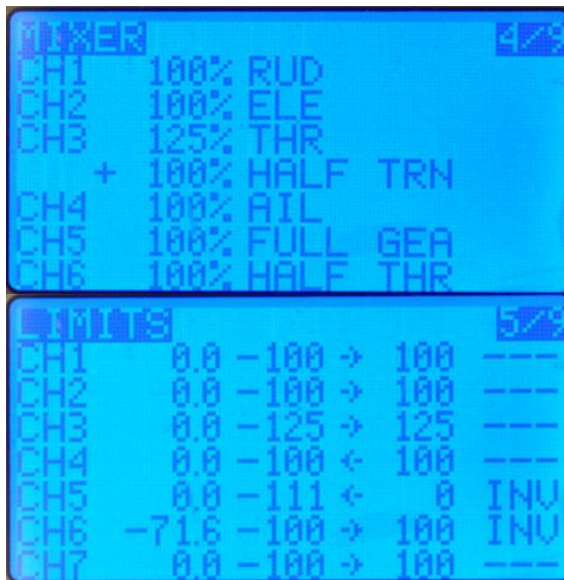


Figura 39. Menú de mezclas y límites

En nuestro caso las mezclas se utilizan para realizar programaciones experimentales, como al accionar el throttle, el deflector tipo II se accione de forma progresiva, de forma que se compense el aumento de sustentación (como consecuencia de aplicar más potencia a todos los motores) con una deflexión mayor del aire, (esto se realiza para pruebas experimentales del prototipo).

Como se ha indicado anteriormente, las curvas que describen, para todos los accionamientos proporcionales de la emisora son programables, o bien desde la propia emisora o mediante un ordenador. Esto es útil en determinadas situaciones, si buscamos precisión en los movimientos le programaremos una curva exponencial, si queremos sencillez y proporcionalidad utilizaremos una curva recta, siendo en todas ellas importante el valor máximo. Para el control de ambos deflectores se utilizará una respuesta lineal.

12.5.2. Receptor señal de video (FPV)

El receptor es el dispositivo que recibe la señal de video que nos envía el emisor desde el vehículo, por lo que debe trabajar con la misma frecuencia, aplicando las consideraciones vistas en el apartado anterior para el transmisor de video.

Su función es la de recibir señal de video y plasmarla en una pantalla, informando al piloto de la posición de vehículo y deflector.



Figura 40. Receptor de video 5.8 GHz

El diagrama de conexión del receptor es sencillo, teniendo como entrada la propia antena que recibirá la información, la alimentación del dispositivo y como salida la señal de video que se conectará a un monitor o gafas de realidad virtual. La alimentación se realizará con una batería LiPo de 3s.

12.5.3. Monitor o gafas virtuales

Se podrá utilizar una televisión, monitor, ordenador o gafas de realidad virtual para plasmar la señal de video que tenemos en el dispositivo anterior. En este documento se utiliza un monitor de 7”.

En todas las señales de video se utilizará un conector RCA, ya que la calidad en la imagen de video transmitida es baja, teniendo en cuenta que las mayores resoluciones transmitidas son del orden de 700TVL.

12.5.4. Selección de componentes

Es el primer paso, una vez entendido el comportamiento de dichos componentes. En las líneas anteriores se han justificado de forma teórica la función de los componentes, pero se en este punto se presentarán de forma resumida los componentes seleccionados teniendo en base lo anterior.

12.5.4.1. Motor - Hélice

El motor y la hélice debe seleccionarse conjuntamente, ya que están mutuamente ligados, por lo que si queremos hacer una buena selección del conjunto deberá de hacerse de forma iterativa.

Para ello se puede comenzar por la selección de los motores, ya que relativamente son elementos costosos y existe una amplia variedad, siendo un componente crítico en el comportamiento del vehículo. En el presente trabajo, los parámetros a tener en cuenta para seleccionar dicho componente son:

- Configuración
 - Outrunner
- Bajo número kV (kilovoltios) (200 - 900 kV)
- Voltaje máximo admisible de 12.7 V
- Hélice máxima admisible de 13"
- Alto número de pares de polos (10-22)
- Empuje > 10 N

El primer hándicap a superar es la configuración de dicho motor. Por lo justificado anteriormente y las ventajas que nos aporta, se escogen motores Outrunner, sección 12.4.2 Motores Página 47.

Así, se analiza la variedad que se presenta y los parámetros arriba indicados, se llega a la conclusión que será adecuado un motor el cual su voltaje máximo, sea los 12.7 V, es decir, que funcione con 3S. Esto estará íntimamente ligado con la velocidad de reacción de dichos motores, a mayor voltaje mayor será la velocidad de respuesta de dicho motor, en nuestro caso es un vehículo que no se busca un vuelo acrobático, por lo que será más determinante el tamaño de la hélice. Además, este voltaje presenta ventajas, en cuanto a que otros dispositivos del vehículo funcionarán a este mismo nivel de tensión, por lo que se omiten reguladores de tensión.

En cuanto a kV deberemos buscar un motor con bajo número de revoluciones, ya que la potencia viene dada por $P = M \cdot \omega$, si aumentamos las revoluciones reduciremos el par, por lo que no se podrá montar una hélice de mayor tamaño. Se sabe que no es recomendable una hélice demasiado grande al hacer el vehículo muy aparatoso ni muy pequeña, ya que será más inestable en su vuelo y con un rendimiento más bajo, hecho que no nos interesa, ya que al accionar el deflector tenderá a hacer inestable el vehículo y llegará a ser más inestable con una hélice pequeña.

Es por ello, que necesitamos mover una hélice de tamaño moderado-grande (10-14”), por lo que se considera bajos Kv, con bajos kV se refiere a un rango de 900 - 200 kV.

También se busca un motor con un alto número de polos, ya que tendrá más par y lo hará más preciso el control de su posición, además de un movimiento más suavizado. Es por ello que se selecciona el motor con referencia Hextronik DT700 junto con una hélice APC 12x4.5 SF, cuyas características se estudian en el siguiente punto.

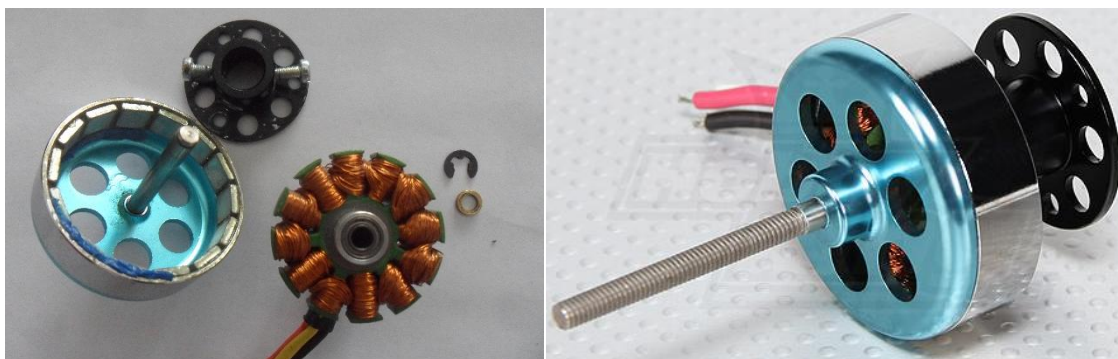


Figura 41. (izquierda) se muestra la configuración del motor, 12N14P. (Derecha) vista general del motor Hextronik DT700

12.5.4.1.1. Curvas características del motor

Se tienen las siguientes curvas características (obtenidas con pruebas experimentales y banco de ensayo, sección 22.4 Banco de ensayo de motores eléctricos de aeromodelismo, página 190

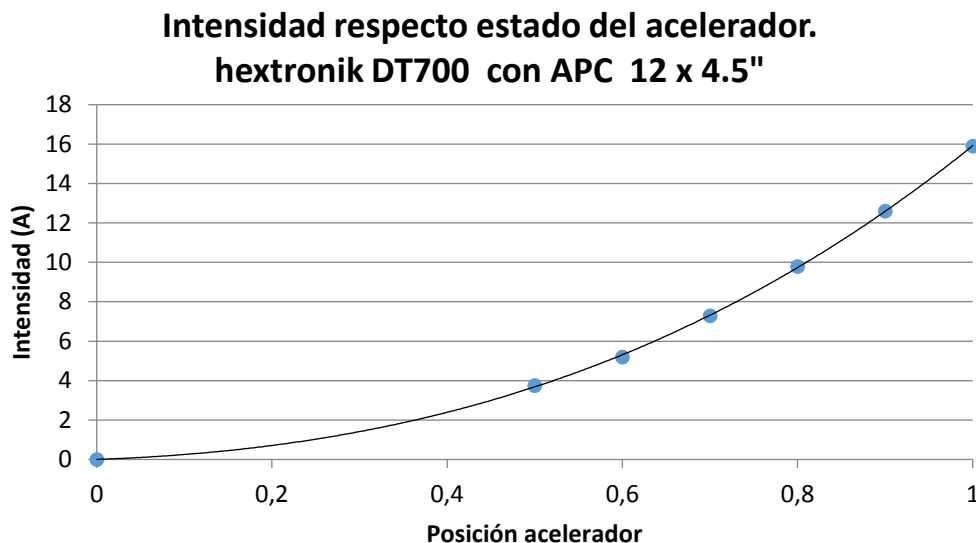


Figura 42. La intensidad sigue una distribución cuadrática con la potencia o posición del acelerador. Según $P=R \cdot I^2$

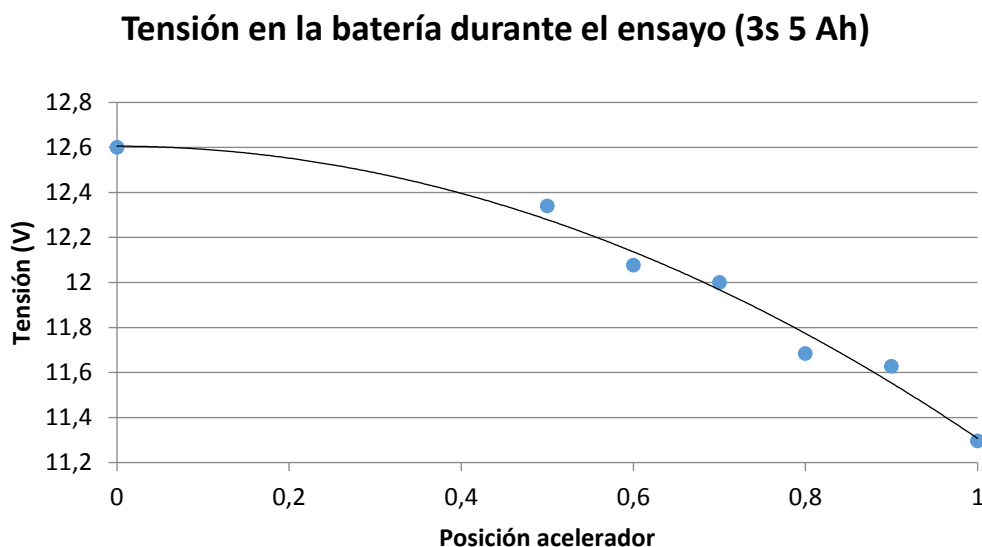


Figura 43. La tensión de la batería cae considerablemente al aplicarle potencia al motor.

La intensidad máxima que se alcanza con esta hélice es de 15.9 amperios, mientras que la potencia máxima sigue una distribución similar, ya que se ensaya con una batería LiPo 3S de 5000 mAh (20C) y la tensión durante el ensayo cae como se muestra en la gráfica anterior. Se tiene una caída de tensión importante en la batería, pasando de 12,6 V a 11.3 V.

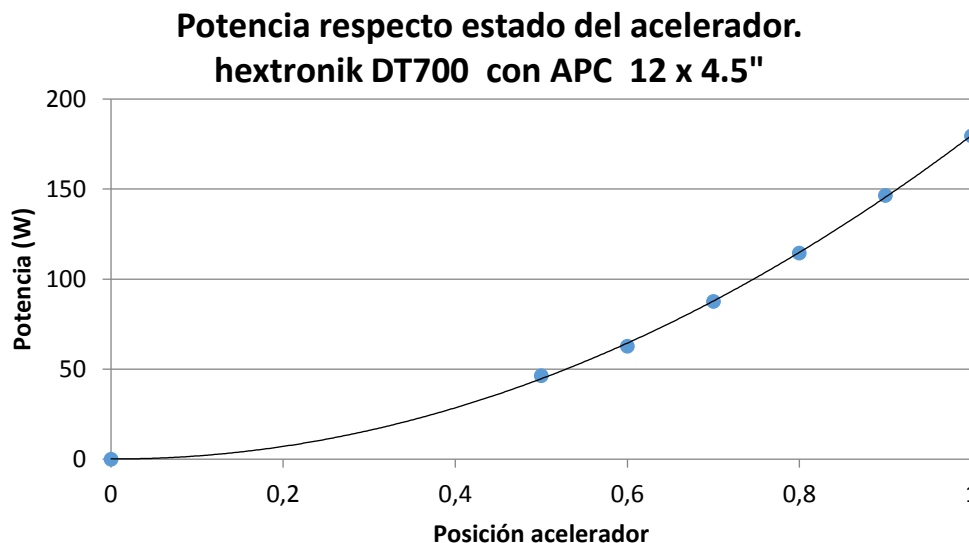


Figura 44. La potencia también sigue una distribución cuadrática, de forma análoga a la Figura 42.

La potencia máxima que se tiene con esta configuración es de 180 W. Este parámetro condicionará la selección del variador de velocidad.

También es de destacar el empuje que nos proporciona el motor, como se muestra en la siguiente curva, alcanzando un máximo empuje de 1209 g.

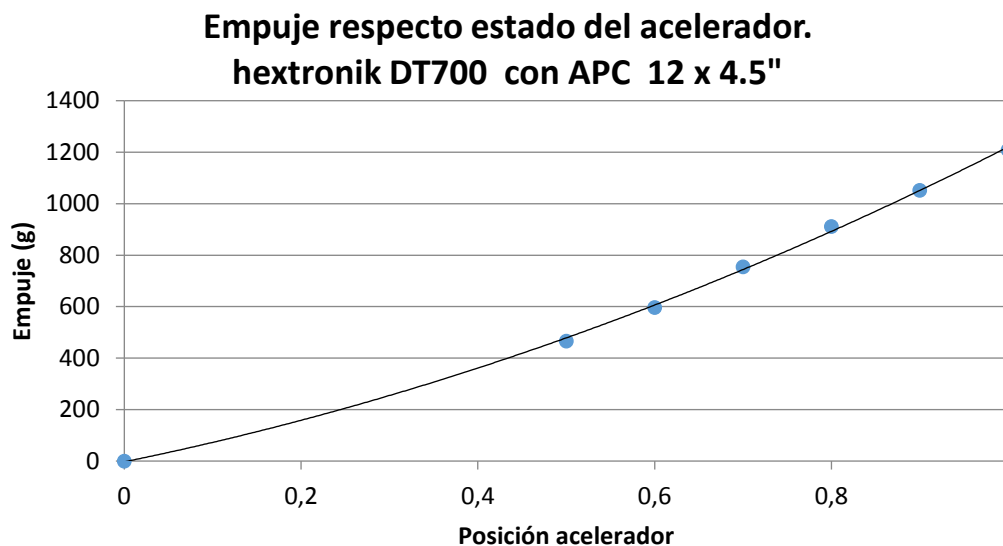
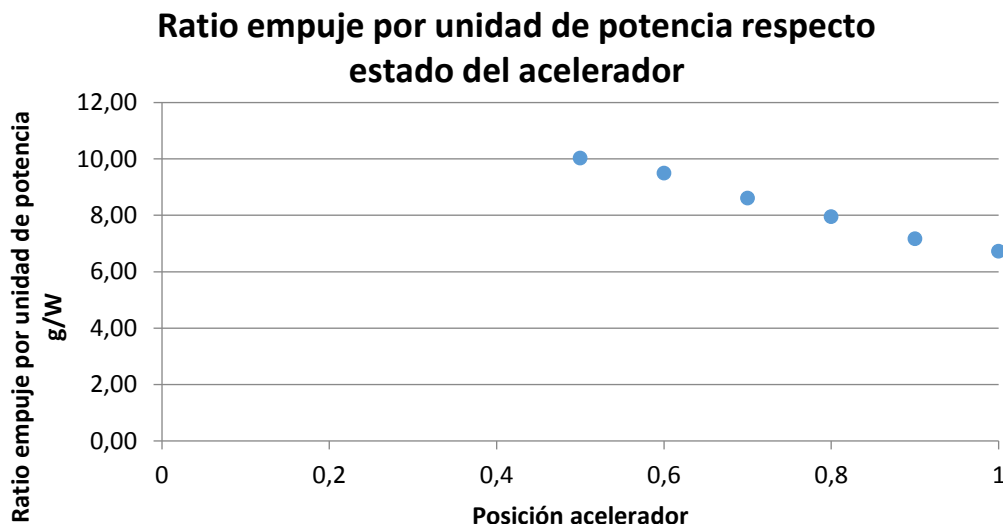


Figura 45. Empuje seguido por el motor. Se ha considerado una tendencia cuadrática ($R=0,9991$), siendo válida también lineal ($R=0,9802$)

Además, se obtiene el ratio empuje por unidad de potencia eléctrica, también llamada eficiencia.



Donde en la gráfica anterior no tiene sentido obtener valores menores a un 50 % de la aceleración del motor, al no conseguir suficiente potencia para hacer despegar el vehículo. Si consideramos la ecuación de una tendencia cuadrática para el empuje, y sustituimos el valor del 50%, se tendrá el empuje dado para este estado, teniendo

$y = 520,8x^2 + 702,5x - 2,8706$; $x=0.5$; se tiene un empuje de 478,5 g por cada motor (insuficiente para levantar el vehículo).

En dicha gráfica se muestra como a mayores velocidades, la eficiencia será menor, aumentando el consumo de energía.

Con las anteriores curvas se verifica que el conjunto seleccionado es adecuado para al que se pretende.

12.5.4.1.2. Curvas características de la hélice

De cara a las simulaciones, será interesante conocer la distribución de aire generada en la hélice. Para mostrar la distribución de velocidades que tiene la hélice el ensayo se realiza a un 22.5% de la potencia, por ello los valores máximos de la velocidad no coinciden con los mostrados en la simulación del punto 15 de este documento. Es decir, cuando el vehículo se encuentra en vuelo se utiliza el 54% de la potencia total de los motores, (esta cantidad varía al cambiar la configuración y masas del vehículo).



Se realizan ensayos experimentales, mediante la utilización del banco de ensayo y el anemómetro que se muestra en

Figura 46. Anemómetro indicando la velocidad máxima alcanzada

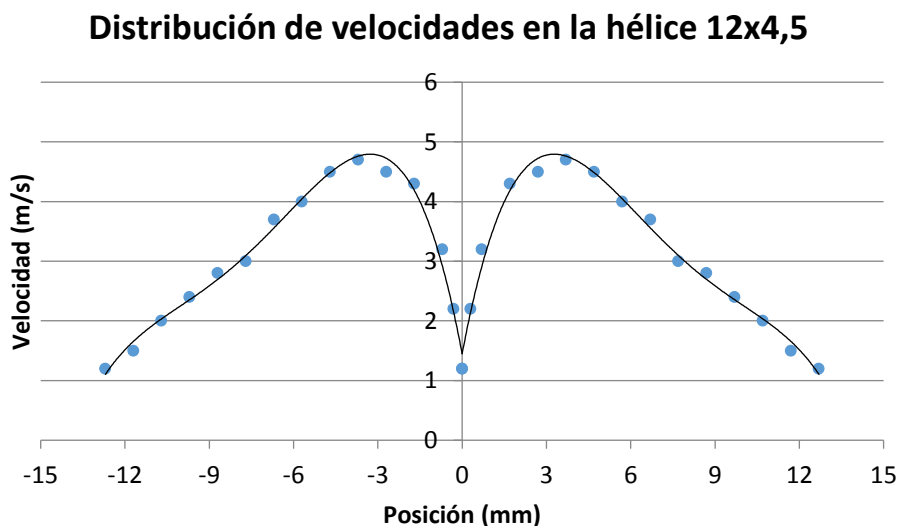


Figura 47. Distribución de velocidades en una hélice.

Para saber la distribución de velocidades al 54% tan solo se tendrá que escalar la gráfica en el eje y.

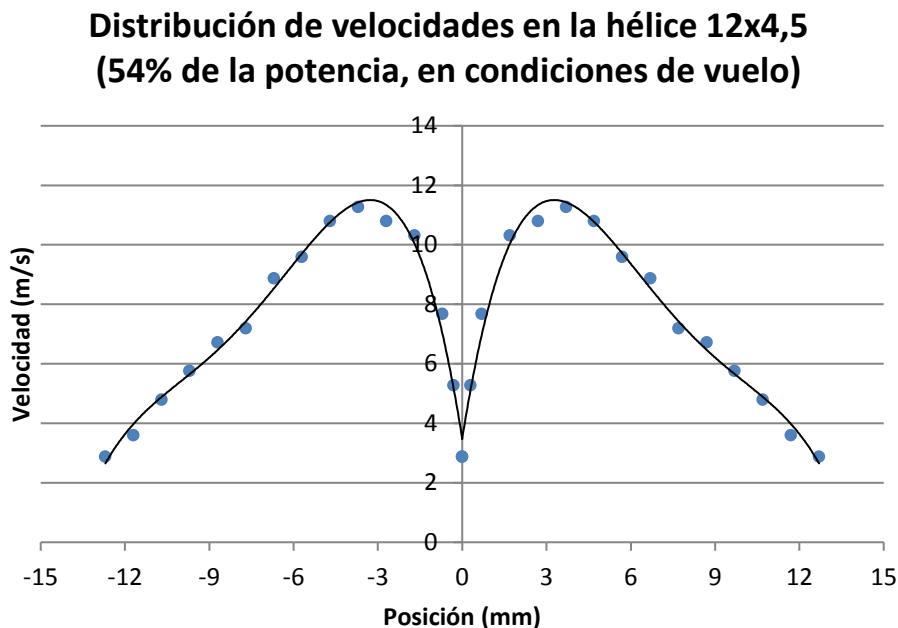


Figura 48. Distribución de velocidades de la hélice discretizada en la potencia de despegue.

Esta gráfica se entiende mejor con la explicación dada para el caso de la turbina en el punto 7012.6.2.1. Siendo principalmente causada por geometría de la hélice y parámetros de diseño del fabricante.

Para profundizar en el conocimiento de diseño de hélices se recomienda (Meacock, 1947) y (Peragón)

12.5.4.2. Variadores de velocidad. ESC.

Se consideran los siguientes parámetros para la selección de estos:

- Corriente nominal y de pico
- Frecuencia de funcionamiento
- Software en su funcionamiento

El amperaje es el parámetro más importante, es el que determina el tamaño del componente físicamente, y por ende su masa. Como es normal, este debe de ser mayor o igual al que requiere el motor, se recomienda que sea ligeramente mayor para que si se cambia algunos parámetros de configuración el variador no sufra daños.

Por lo que, si analizamos las especificaciones de nuestro motor, con una hélice de 12x4.5, entrega una potencia máxima de 180 W, siendo la tensión a la que trabaja (11.3

V) y amperaje 15.93 A. Así, se buscarán variadores de como mínimo 20 A para dicha hélice, si se cambia la hélice se requerirá más amperios, por ello (al tratarse de un prototipo susceptible de cambios) se eligen unos variadores de 25 A.

En cuanto a la frecuencia a seleccionar, para un dron de vuelo estable no será determinante, ya que no se requerirán grandes aceleraciones en los motores. Aun así, es conveniente ser consciente de la velocidad de refresco de estos, este parámetro vendrá determinado por la controladora en sus salidas PWM, que serán la entrada del ESC. Es decir, según las especificaciones la controladora elegida dará una frecuencia máxima de 400 Hz, por lo tanto, los variadores que se implementan deben contener esa frecuencia o mayor.

Una vez comprendido esto se selecciona un variador que sea capaz de leer dicha frecuencia (400 Hz). Encontrando una buena relación calidad precio, y cumpliendo los requerimientos anteriores se eligen los variadores Turnigy Plush 25 A cuyas especificaciones se encuentran en (Turnigy).

12.5.4.3. Baterías

Por lo que respecta a las baterías y a lo que se describió en los apartados anteriores se elige la tecnología LiPo con conexionado de tres celdas en serie (3s) y uno en paralelo (1P). Las capacidades y características principales se muestran a continuación (todas las baterías utilizadas en el prototipo):

- LiPo 350 mAh 3s 25C para el emisor de video situado en el UAV (49 g).
- LiPo Turnigy 5000 mAh 3s 25C para la alimentación del UAV. (412 g)
- LiPo Turnigy 2200 mAh 3s 20C para la recepción de señal de video en la estación de tierra y alimentación de la pantalla LCD de 7". (188 g)
- LiPo 2650 mAh 3s 1C para la alimentación de la emisora que controla el vehículo desde tierra (157 g)

También se han indicado las masas, ya que para estimar la carga del vehículo y análisis tensionales habrá que tenerlo en cuenta.

12.5.4.4. Controladora de vuelo

Por su sencillez, estabilidad y precio se elige la controladora de vuelo de la marca comercial DJI NAZA v2 ®. Como se explicó en el apartado correspondiente existen una gran diversidad de controladoras, predominando las de software libre, pero requiriendo mucha más complejidad de programación y pruebas de vuelo hasta conseguir un vuelo estable. En cambio, esta opción es algo menos económica, pero será muy sencillo realizar los primeros vuelos.

El objetivo de este TFG no es la programación exhaustiva de la controladora, sino que el principal objetivo es tener un vehículo estable, que permita realizar pruebas del prototipo, sin añadir complejidad adicional a la que ya se tiene con el propio dispositivo planteado. Esta plataforma es comercial y por tanto sencilla e intuitiva de programar.

Esto es un punto a mejorar en el futuro, ya que las controladoras de software libre ofrecen muchas más posibilidades, hecho que es importante si pretendemos sincronizar el movimiento del vehículo con otros sensores. En nuestro caso se pueden sincronizar con algunos sensores sencillos, de forma externa, sin influir en la trayectoria del vehículo, es decir, se realizará una trayectoria y el deflector se adaptará a la trayectoria seguida, sin ser retroalimentado.

El fabricante dispone de varias versiones, siendo las más utilizadas (a nivel usuario) la Naza-Lite V2 ® y Naza-M V2 ®. La diferencia entre ambas, es en la segunda, tiene la posibilidad de instalar un módulo de telemetría que hará controlar el vehículo de forma automática con una ruta predeterminada. Es decir, la primera dispone de GPS para su control, pero no le podremos definir una ruta a seguir. Es por ello que para este trabajo se utiliza la Naza-M V2 ®, ya que de lo contrario nos alejaríamos de los objetivos marcados.

Para más información acerca del uso parámetros de la controladora utilizada consultar (DJI) y para el control mediante rutas programadas consultar (DJI) y (DJI)

12.6. En mecanismo de pulverización

Una vez descritos los componentes electrónicos que permiten el vuelo del vehículo aéreo se describirán los componentes electrónicos que harán el control del deflector.

12.6.1. Elementos comunes

12.6.1.1. Servos

El movimiento de este se realiza mediante servos. El funcionamiento de los servos está basado en el PWM (Pulse Width Modulation), modulación de ancho de pulso. Esta modulación directamente la proporciona el receptor de señal de la emisora principal. Por lo que la conexión de estos es sencilla si se controlan directamente, de forma manual desde tierra. Tan solo se tendrá que alimentar los servos de una fuente distinta a la que nos

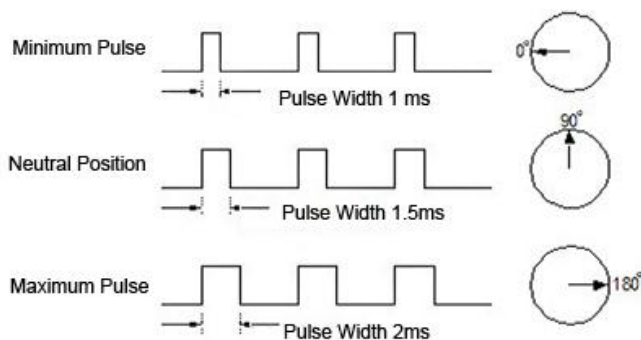


Figura 49. Modulación del pulso.

proporciona el propio receptor, ya que al utilizar servos de tamaño estándar, consumen demasiada potencia y el receptor se puede sobrecargar (próximos a 10W, justificado más abajo). Si se utilizan servos analógicos el consumo es menor si se compara con digitales.

En primera instancia se consideran servos Tower Pro MG 995, según las especificaciones del fabricante (TowerPro) son capaces de proporcionar un par a 6 V de 11 kg-cm=1,079 N-m a una velocidad angular de 0.16s para 60°. Por lo que para realizar una vuelta tarda 0.96 segundos y pasado a revoluciones por

Modulation:	Digital
Torque:	4.8V: 130.54 oz-in (9.40 kg-cm) 6.0V: 152.76 oz-in (11.00 kg-cm)
Speed:	4.8V: 0.20 sec/60° 6.0V: 0.16 sec/60°
Weight:	1.94 oz (55.0 g)
Dimensions:	Length: 1.60 in (40.7 mm) Width: 0.78 in (19.7 mm) Height: 1.69 in (42.9 mm)

Figura 50. Especificaciones servo TowerPro MG995

minuto serán 62,5 rev/min por lo que por definición de potencia, $N = M \cdot \omega$ donde si se introduce en las unidades correctas se tiene 7,1 W, la cual se verá afectada por el rendimiento del conjunto mecánico y eléctrico.

Si se supone un rendimiento alto, además de que la caja de engranajes dispone de rodamientos y buen engrase se puede considerar una potencia eléctrica del servo de aproximadamente los 10 W anteriormente mencionados.

Si se considera lo anterior $P = V \cdot I$ $10 \text{ W} = 6 \text{ V} \cdot I \rightarrow \boxed{I = 1.7 \text{ A}}$ quedando justificando que no se puede conectar directamente al receptor o controladora de vuelo. Por lo que se debe alimentar los motores directamente de la fuente de alimentación y no desde el receptor, ya que se sobrecarga el receptor, así desde el receptor solo se conectan los cables de la señal correspondientes a cada motor. Puede darse el caso en el cual se desprecie lo dicho anteriormente y dichos motores no den la potencia para los que están calculados o en el peor de los casos se estropee la electrónica, ya que el motor necesitará que se le suministre dicha intensidad, si no se la proporciona se sobrecalentarán los componentes que acabarán por destruirse.

12.6.2. Versión I. Estabilizado

12.6.2.1. Turbina

Como elemento generador de aire adicional al proporcionado por el vehículo, en el deflector tipo I se propone el uso de una turbina, por la velocidad del aire que nos proporciona, además de su bajo peso. El fabricante nos aporta las siguientes características de dicha turbina. (QX-Motor)



Figura 51. Turbina eléctrica empleada (QX-Motor).

Description:

Brand Name: QX-Motor

Item Name: Ducted fan with brushless motor set

Ducted Fan: 64mm 12 blades

Motor: QF2822 brushless motor

Recommended Battery: 3-4s Lipo (not included)

Recommended ESC: 60A,80A (not included)

Specifications of Motor:

KV	3500	Idle Current @10.0V	3.5A
Configuration	9N6P	No.of Cells(Lipo)	3-4S
Stator Diameter	22mm	Max Continuons Current(A)/60s	55A
Stator Length	22mm	Max Continuous Power(W)/60s	850W
Shaft Diameter	Φ4mm	Max Efficiency	>70%
Motor Dimension	28x61mm	Internal Resistance	0.033oh,s
Weight	90g	Recom. ESC	65A

Tested With 80A ESC:

Prop	Volts(V)	Amps(A)	Watts(W)	Thrust(g)	Thrust(oz)	Efficiency(g/w)	Efficiency(oz/w)
64FAN/12-Blade	14.8V	52.0	769.6	1250	44.09	1.62	0.06

Figura 52. Características principales de la turbina empleada. (QX-Motor)

12.6.2.1.1. Estimación teórica y ensayo experimental

Como se aprecia en Figura 52, el fabricante no nos suministra los datos para una batería 3S, que será lo que se utilice en el presente trabajo, por lo que se procede al ensayo en el banco destinado a ello, sección 22.4 Banco de ensayo de motores eléctricos de aeromodelismo, página 190. En este caso, se mide el empuje y velocidad del viento a 20 cm de la tobera, que es una distancia similar a la que se considere para la aplicación de fitosanitarios. Obteniendo los resultados que se muestran más abajo

Por otro lado se puede realizar una estimación teórica (Peragón), (Piqueras, y otros), (Hünecke, 2000), (Muñoz Torralbo, y otros, 2005) teniendo en cuenta que $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$ se obtiene el flujo másico que mueve la turbina anterior, siendo su máximo en para esta configuración de ensayo en 0.103 kg/s.

Si se tiene en cuenta la segunda ley de Newton con la variación de la masa constante queda como sabemos:

$$F = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = \frac{mdv}{dt} = m \cdot a$$

La turbina produce el empuje como consecuencia de acelerar las moléculas de aire. Si se pudiera medir la aceleración de cada partícula de aire y se conociera la masa de dichas partículas, la suma sería el empuje total proporcionado.

Por otro lado, si consideramos que la velocidad es constante para cada partícula tendremos $F = \frac{d(mv)}{dt} = \left(\frac{dm}{dt} \right) \cdot v = \dot{m} \cdot v$. Esto será una simplificación común en el estudio de motores de propulsión a chorro.

Como sabemos la velocidad de inicio y final de las partículas, se puede calcular la fuerza como $F = \dot{m} \cdot \Delta v = \dot{m} \cdot (v_{salida} - v_{entrada})$. En esta ecuación se aprecia como al incrementar la velocidad del flujo a la entrada el empuje de decremента.

Con la expresión anterior del flujo másico a la salida (conocemos la velocidad de salida), $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_{salida}$ se tiene que $F = \dot{m} \cdot \Delta v = \rho \cdot A \cdot v_{salida} \cdot (v_{salida} - v_{entrada})$

Si en la expresión anterior se sustituye el área (sección transversal $A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$) se tiene que:

$$F = \rho \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot (v_{salida}^2 - v_{salida} v_{entrada})$$

Si realizamos una comparación entre lo obtenido y lo teórico tendremos la siguiente gráfica:

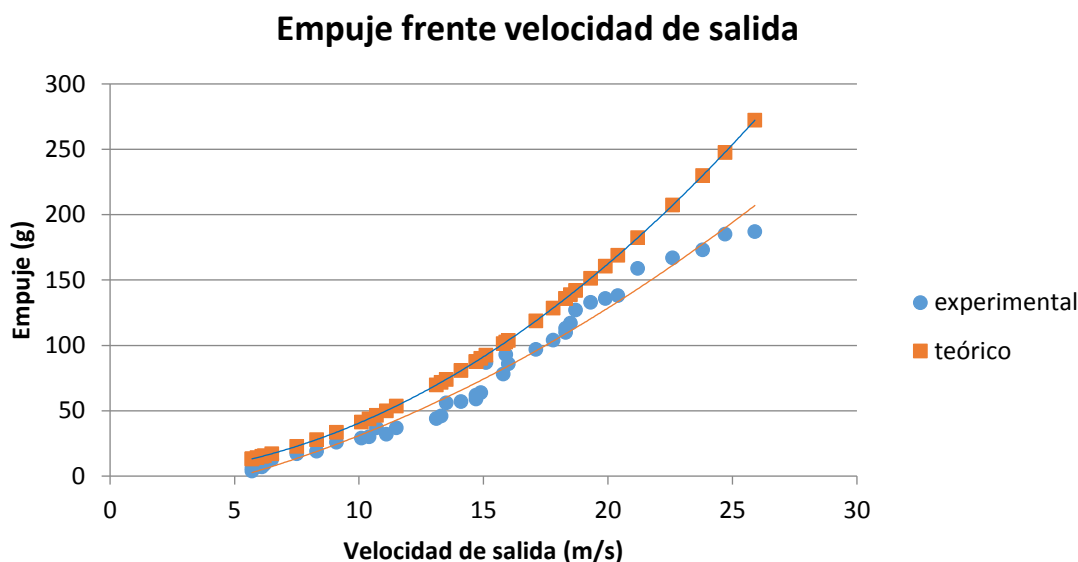


Figura 53. Velocidades de salida de la turbina teórico y experimentales. A máxima potencia se obtiene una diferencia de resultado de un 31 %, valor aceptable si se tiene en cuenta las consideraciones de más abajo.

A la vista de la gráfica anterior, para los resultados experimentales se aprecia un máximo para 25.9m/s, lo que es lo mismo a 93.24 km/h, además de un empuje de 187 g, muy lejos del dato de empuje que nos suministra el fabricante (con otra configuración). Mientras que teóricamente se alcanzaría un empuje de 272,28 g, es decir, un 68,7 % del teórico.

La diferencia está causada por algunas consideraciones,

- La primera de ellas es por la consideración de que el flujo másico es constante en una misma área transversal. Y como sabemos esto no es así, ya que como se muestra en la sección 12.5.4.1.2 Curvas características de la hélice, página 65, la velocidad que circula sobre dicha sección no es homogénea. Esto tiene su explicación con el conocimiento de que una hélice es un perfil alar en rotación, donde las partes internas (junto al eje) tendrán menor velocidad lineal, por tanto, si queremos impulsar el mismo aire el paso o ángulo de ataque debe de ser mayor. Para paliar esto existen teorías de torsión de álabes, estudiadas en la asignatura

Máquinas térmicas (Peragón), pero como de forma semejante a la h'lice como se muestra en

- Otro motivo por el que difiere las medidas experimentales y teóricas es por la diferencia de velocidades existente entre la salida de la tobera y 20 cm más allá de esta.



Figura 54. Detalle de la torsión de los álabes en la turbina utilizada. Para mantener el flujo másico constante a través de la sección transversal de esta se torsionan los álabes como se muestra (Peragón).

13.6.2.1 ESC

Para poder realizar el ensayo anterior se necesita de un variador de velocidad (ESC), por lo que se debió comprar para poder ensayar dicho motor. Posteriormente a esto, se puede medir la potencia y/o corriente de dicho motor,



Figura 55. ESC utilizado en turbina QX- Motor (series).

realizando un ajuste fino del variador de velocidad, ya que se inicialmente compró atendiendo a las especificaciones del fabricante (60 A).

Es por ello, que si se quiere implementar en el vehículo se debe de realizar los ensayos anteriores, sección 12.6.2.1.1 Estimación teórica y ensayo experimental, página 71 para determinar la potencia, y de esta forma se dimensiona correctamente el variador de velocidad, ya que, como en este caso, se tiene una potencia menor de la que nos recomienda el fabricante (QX-Motor).

12.6.3. Estabilizador del deflector versión I

Se compone de un microprocesador de la serie Atmel, al que se le instala el sensor MPU 6050 (sección 12.4.6.1.2 Acelerómetro + Giróscopo, página 55).

Su función es la de establecer la posición de este y que este sea automáticamente corregido independientemente de la posición del dron. Es decir, una vez seleccionada una determinada posición el Arduino se encargará de mantener esta posición en el deflector para un cierto movimiento del propio vehículo. Esto hará que la aplicación de fitosanitario sea independiente de la posición del vehículo, que a su vez depende principalmente de la dirección y magnitud del viento. En este trabajo se utilizará directamente una PCB que implementa el sensor y los transistores necesarios para controlar los servos. En concreto se utilizará la PCB Martínez V3 (Miller, y otros) que se muestra en la imagen.

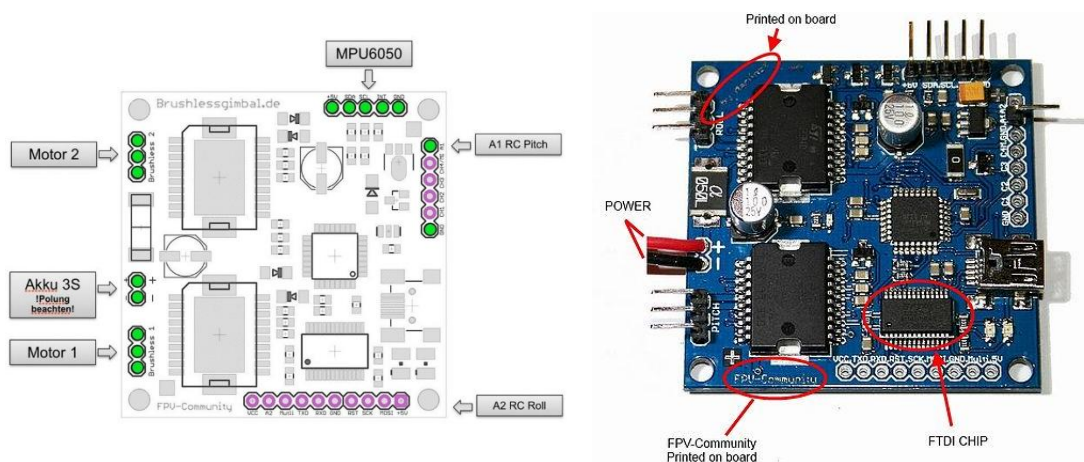


Figura 56. (Izquierda) las señales A1 y A2 se conectarán respectivamente X1 y X2 en la controladora. Aspecto físico de la placa para placa Martínez V3, como se muestra no requiere de FTDI externo para su programación. (Miller, y otros)

Las mencionadas placas se emplean actualmente para estabilizadores de imagen o gimbal, utilizados en aplicaciones relacionadas con la industria audiovisual, pero en

nuestro caso, en lugar de instalar una cámara de video o fotográfica se instala una placa plana que incluye los medios de pulverización, llamando al conjunto, deflector. También se aprecia en el modelo CAD realizado para la explicación del funcionamiento de dicho dispositivo.



Figura 57. Distintas vistas de la situación y funcionamiento del deflector.

Es decir, la forma más sencilla es la de establecer la posición del deflector es desde la propia emisora. Técnica más rudimentaria que haría una constante intervención del operario, además de desviarse del objetivo de ser preciso en la aplicación de este. Aun así, es el primer paso para testear y verificar el funcionamiento de este.

La versión que se propone, y por ende, por la que se hace referencia a la controladora del gimbal (Miller, y otros), Figura 56 es porque con esta placa (y consecuente programación del PID) hará que el deflector siempre este situado en una posición determinada, independientemente de la posición del vehículo. Es decir, el

control de dicha posición lo realiza el piloto (si se emplea un modo de vuelo manual) pero automáticamente se corregirá el movimiento sobre esa consigna.



Figura 58. Simple BGC GUI 2.2 o interfaz de programación del estabilizador gimbal. Además para su programación también se requiere del uso del firmware XLoader con avrdude.conf (Miller, y otros)

12.6.4. Deflector tipo II

Ya se han mostrado cómo es el diseño del deflector tipo II (López Alba, y otros)

La segunda versión aquella se compone de un servo, que modifica la orientación del deflector, siendo el que nos permite modificar el ángulo y generar una oscilación para la generación de turbulencia. Por lo tanto, se compondrá de un Arduino, el cual las operaciones que debe realizar son:

- leer la señal que le llega desde el receptor
- calcular el ancho de pulso de esta
- generar una oscilación a dicha señal

Dicho movimiento queda mejor explicado con la siguiente imagen

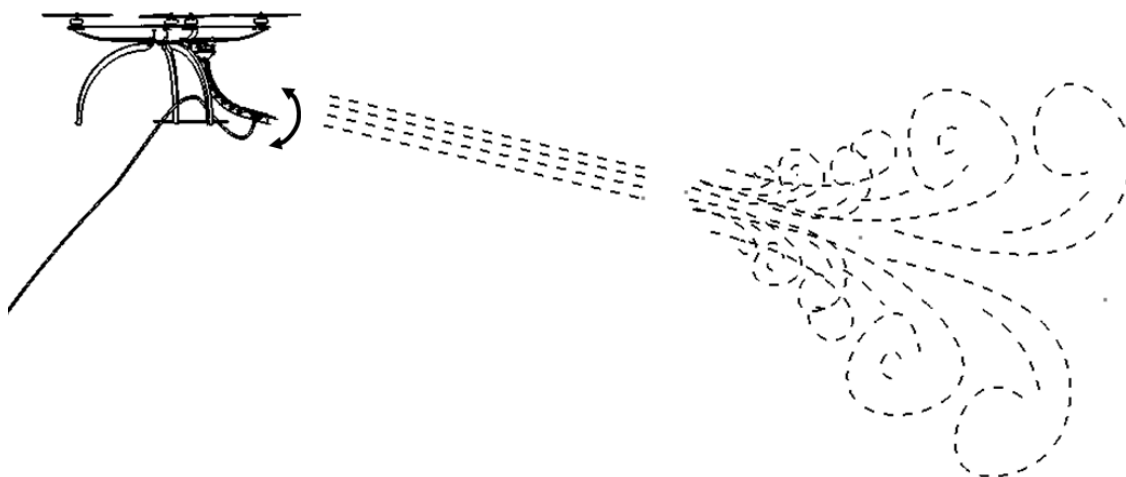


Figura 59. Movimiento oscilante generador de turbulencia, nombrado en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., **página** ¡Error! Marcador no definido..

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones a la hora de realizar la programación de este,

- La ejecución del código en Arduino es secuencial. Por lo que constantemente debemos leer el ancho de pulso en cada momento, y a ese valor, sumarle periódicamente una oscilación, positiva o negativa, escribir ese valor y seguir ejecutando el código.

En la sección 22.6 PROGRAMAS ARDUINO, página 197 se adjunta el programa base de Arduino para realizar el funcionamiento del deflector. Dicho programa lee la señal que se tiene en el receptor de la emisora y acciona el servomotor (en dicho código no se ha implementado el movimiento de oscilación).

Por lo tanto, para el caso del control manual no se implementa ningún sensor, ya que se puede realizar directamente con Arduino.

12.6.5. Sensores a implementar en trabajo futuro

Se pretende dejar constancia del potencial de mejora del prototipo. Siendo uno de los puntos importantes a mejorar la implementación de sensores que aumenten el potencial de utilización del sistema. En las siguientes líneas, se muestran algunas de las mejoras posibles al prototipo. No se han llevado a cabo en este trabajo, ya que cada una de ellas podría ser un trabajo como tal.

Es decir, la idea es sincronizar los deflectores con los propios sensores de la controladora principal, de forma que cuando se tengan ciertas condiciones en esta, se active una determinada función. Es decir, cuando se alcancen determinadas coordenadas

(dadas por el GPS) o cierta altitud (principalmente sensor barométrico) se realiza un determinado movimiento en el propio deflector, o activando y desactivando otras funciones como los elementos auxiliares de pulverización.

Otras posibilidades planteadas son:

- Escáner 3D. Implementar el escáner como sensor es la versión más completa del sistema, pero para ello antes se debe experimentar con otros sensores como:
- Ultrasonidos / infrarrojos. Es sencillo medir distancias con ultrasonidos, pero no se sabe la precisión que se tiene cuando se mide un objeto poroso, como se puede considerar un árbol o arbusto. Por ello se debe probar la eficacia de un sensor, y la posibilidad de completar dicha información con otros sensores.

Lo anterior haría que nuestro sistema tenga muchas más ventajas, ya que se puede obtener en tiempo real la geometría exacta de la plantación y ello debe de reflejarse en el movimiento del vehículo y deflector. Por tanto, se trataría de un sistema retroalimentado y flexible, en cuanto a que previamente se le define una ruta aproximada (previa al vuelo), pero en tiempo real, durante el vuelo el vehículo podrá hacer modificaciones a dicha ruta en un cierto rango.

Otro punto de vista, en lugar de modificar las coordenadas en tiempo real, sin borrar las coordenadas del siguiente Waypoint es añadir una subrutina. Un subproceso que desactive temporalmente el GPS y el vehículo sea controlado por el escáner 3D, y cuando se realice el escaneo completo que vuelva al Waypoint actual para seguir con el siguiente. Por lo tanto, el problema sería algo más sencillo, ya que el GPS está aislado del escáner.

12.7. Diagramas de conexión

Será el que no contenga elementos auxiliares como FPV y telemetría. En nuestro caso la mayor parte del diagrama de conexión es indicado por el fabricante, con la particularidad de el conexionado realizado en los deflectores Figura 60.

Se compone de la controladora de vuelo, a la cual se le conectan los variadores de velocidad (ESC) a los cuales se conectan los motores. Se tiene en cuenta que para invertir el sentido de giro de los motores tan solo se tiene que intercambiar dos fases de

este. Por otro lado, la controladora se conecta al receptor, con al menos 4 cables (uno por cada señal), además de las señales auxiliares. A la controladora también se le conectan sensores externos, como GPS, bluetooth u otros si se requiere. La alimentación principal del conjunto viene por los ESC, pasando a la controladora por el mismo conector que llevaba la señal entre ambos elementos.

Además, para la programación de la controladora directamente la conectaremos al pc mediante micro USB, mientras que otras plataformas pueden requerir un programador intermedio FTDI.

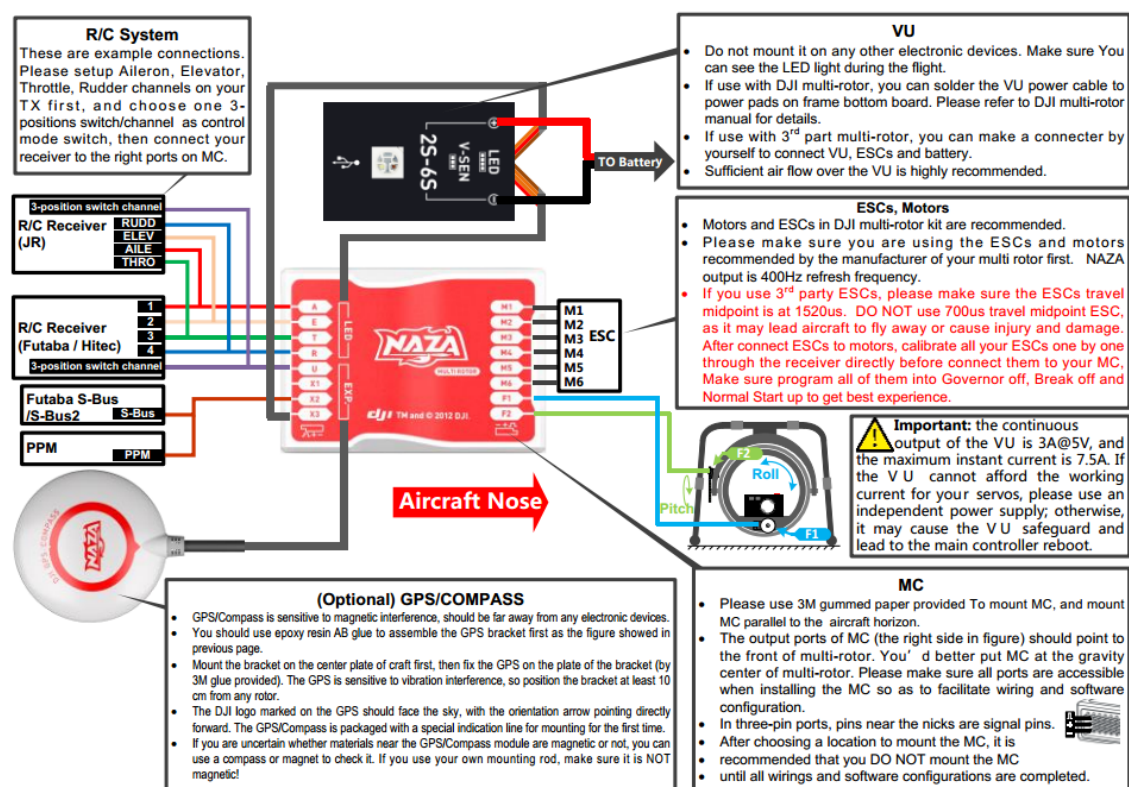


Figura 60. Diagrama principal de conexionado en el vehículo. (DJI). En los pines F1 y F2 será donde se conecten el servo que acciona los deflectores, ambas son señales de PWM que accionará el control del servo. Además los canales X1 y X2 deben de estar conectado al receptor para el control de dichas funciones.

13. ANÁLISIS MECÁNICOS

13.1. Optimización topológica

14.1.1 Introducción

En este documento se muestran los resultados de la optimización topológica realizada con Abaqus®.

La optimización topológica es una parte de la optimización estructural, donde, se busca la mejor distribución del material en un espacio máximo prefijado, cumpliendo unas condiciones de contorno y un mínimo en la función objetivo. Esto es, encontrar el mejor diseño para una determinada estructura, para ello se minimiza una función objetivo en un espacio discreto (en nuestro caso el tocho inicial de partida). Es decir, una optimización es un proceso iterativo, que modifica la estructura del modelo mientras



Figura 61. Esquema seguido en las optimizaciones.

se busca una solución óptima, teniendo en cuenta que los objetivos y restricciones deben de ser cumplidas.

Comúnmente las funciones objetivo a optimizar son el peso, desplazamiento, tensión, volumen y energía de deformación.

El esquema a seguir en las optimizaciones es el siguiente:

La optimización surge cuando se tiene un número mayor de incógnitas que ecuaciones en el problema a resolver. Es decir, si se tiene el mismo número de ecuaciones que de incógnitas el problema está completamente definido y con una única solución (se notaría como simulación). Mientras que, si se tiene un número mayor de incógnitas, es un sistema que puede optimizarse, necesitando en este último caso una función objetivo. (Abaqus)

14.1.2 Formulación

De forma general, los problemas de optimización topológica se pueden definir como:

$$\begin{cases} \min g_0(\mathbf{X}) \\ h(\mathbf{X}) = 0 \\ g_i(\mathbf{X}) \leq 0 \end{cases} \quad \text{Donde } g_0(\mathbf{X}) \text{ es la función objetivo a optimizar (léase por peso,}$$

desplazamiento, tensión, volumen y energía de deformación), que tiene como variable $\mathbf{X}$ (correspondiente al diseño, geometría, material, densidad normalizada, espesor normalizado), llamada variable de diseño. $h(\mathbf{X})$ representa las ecuaciones de equilibrio (restricción de diseño de igualdad), que deben satisfacerse, mientras que $g_i(\mathbf{X})$ corresponde con las restricciones de diseño de desigualdad (m es el número total de restricciones de diseño). Además, existen un límite inferior X_j^{inferior} y superior X_j^{superior} para cada variable de diseño j . Los vectores se han notado en negrita.

$$\begin{aligned} g_i(\mathbf{X}) &\leq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \\ X_j^{\text{inferior}} &\leq X_j \leq X_j^{\text{superior}} \quad \forall j = 1, 2, \dots, k \end{aligned}$$

Por lo tanto, habrá que tener en cuenta que significa cada parámetro antes de configurar la simulación.

14.1.3 Variables de diseño

Es importante distinguir que, como variables de diseño se refiere a magnitudes cuyos valores pueden cambiar a lo largo de la optimización. Pueden ser variable de diseños:

- Propiedades en la sección de la pieza: área, momentos de inercia, momentos de torsión, etc.
- Geometría de la estructura: altura, longitud, espesor, etc.
- Topología de la estructura, densidad del material, superficie, volumen, etc.
- Propiedades constitutivas: módulo de elasticidad, módulo de Poisson, etc.

Por otro lado, se tienen los parámetros, siendo magnitudes constantes durante todo el diseño. La mayor parte de las variables anteriores se considerarán parámetros, para acotar el problema.

14.1.4 Función objetivo

La función objetivo suele ser una función escalar de las variables anteriores elegidas, siendo la condición habitual que se le exige a dicha función, que la solución óptima tome un valor máximo o mínimo. En este caso, al tratarse de un componente aeronáutico, la función a optimizar será la masa del componente (tal y como se viene haciendo desde las primeras aplicaciones de las optimizaciones en la industria aeronáutica).

En cierta manera la masa del componente está relacionada con el precio del componente, además de la clara tendencia de reducción de costes en la explotación del vehículo.

14.1.5 Restricciones

Deben existir en la mayoría de los análisis, como consecuencia de que los problemas complejos, deben analizarse subdividiéndolos en partes, analizando componentes de forma aislada, y por lo tanto debe de tener unas restricciones, para que dicho componente pueda formar parte de un ensamblaje (además es el caso del componente estudiado en este punto) .

Estas, se pueden clasificar como implícitas o explícitas (valor impuesto, tipo dirichlet). Estas últimas son más sencillas, ya que imponen sobre una condición, afectando directamente a las variables del problema en alguna región del análisis. Las condiciones de tipo implícito, actúan sobre una magnitud, que depende a su vez de variables.

Otra clasificación de restricciones, como se ha visto en la introducción, son la de igualdad o desigualdad. Las condiciones de igualdad $h(\mathbf{X}) = 0$ están asociadas con las ecuaciones que fijan el comportamiento de la estructura, ecuaciones de equilibrio, compatibilidad, comportamiento del material, etc. También pueden estar asociadas a restricciones geométricas, como simetrías, tangencias, desmoldes, etc. Las restricciones de desigualdad están asociadas a limitaciones en la respuesta del componente, es decir, tensiones o desplazamientos máximos, frecuencias de vibración, etc. En nuestro caso se emplea una restricción para el ángulo de desmoldeo o despulla, ya que se pretende que en el futuro pueda ser fabricado industrialmente mediante inyección.

Por tanto, el planteamiento del problema consiste en expresar la masa del componente en función de las variables de diseño y tratar de obtener un valor mínimo para dicha masa.

En resumen, para la optimización topológica llevada a cabo, se considera, como variable de diseño la energía de deformación y el volumen. Como función objetivo a minimizar, la energía de deformación; como restricción de diseño de desigualdad, volumen menor o igual al 30%; como restricciones, las condiciones de contorno que se mostrarán y una desmoldeabilidad del componente con ángulo de despulla de 2°.

Para ello en esta parte se elimina el régimen plástico del material, ya que este complica la formulación, y no tiene sentido cuando lo que se pretende es no alcanzar el régimen plástico. En otras simulaciones si se considera el régimen plástico en el material, como es el caso de la sección 22.1 Análisis de impacto vehículo aéreo, página 181.

La parte más importante, es la introducción de las cargas a las que estará sometido, ya que surge una gran disparidad de situaciones distintas a las que se somete el componente.

14.1.6 Procedimiento

Se crea un tocho de partida con los límites que deseamos tener en nuestra geometría. Para ello se crea un prisma rectangular con las dimensiones de 40x30x170 mm, ha sido generado en Catia® y exportado en extensión *.Model, ya que la versión de Abaqus® disponible no admite la lectura de *.stp o *.igs, que son las extensiones normalmente empleadas. Este, como se aprecia, Figura 62, es también una simplificación del problema, como se verá las condiciones de contorno son simplificadas, no analizándose problemas de contactos.

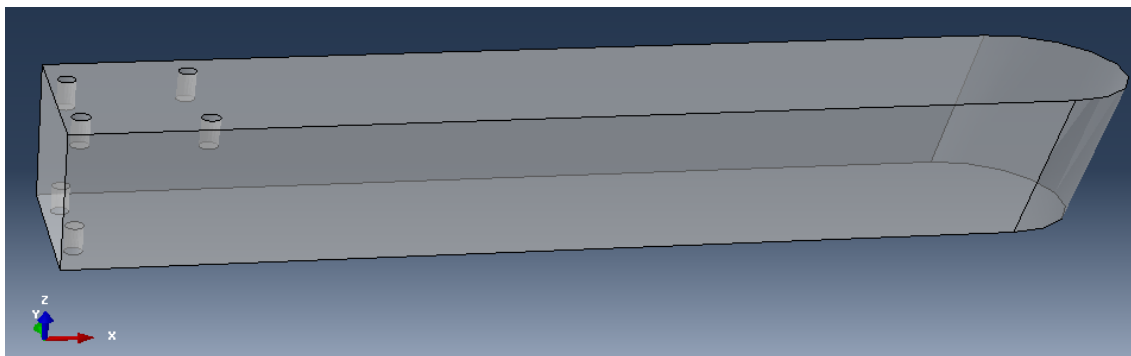


Figura 62. Tocho de partida.

14.1.7 Mallado

Al tratarse de una geometría sencilla es fácilmente mallada con elementos hexaédricos en el propio Abaqus®. Pero inicialmente la geometría que se pretendía analizar era totalmente prismática, y al mallar una circunferencia dentro de un rectángulo es mucho más problemático que mallar dos circunferencias concéntricas. Basado en esto, se simplificó la geometría, redondeando el extremo del tocho de partida, para que las secciones queden concéntricas, por tanto, se aumenta la calidad del mallado. Además, mediante las particiones de cara, se consigue aumentar la calidad del mallado, esto es, si se analiza la malla generada la diferencia entre ambas se justifica su utilización

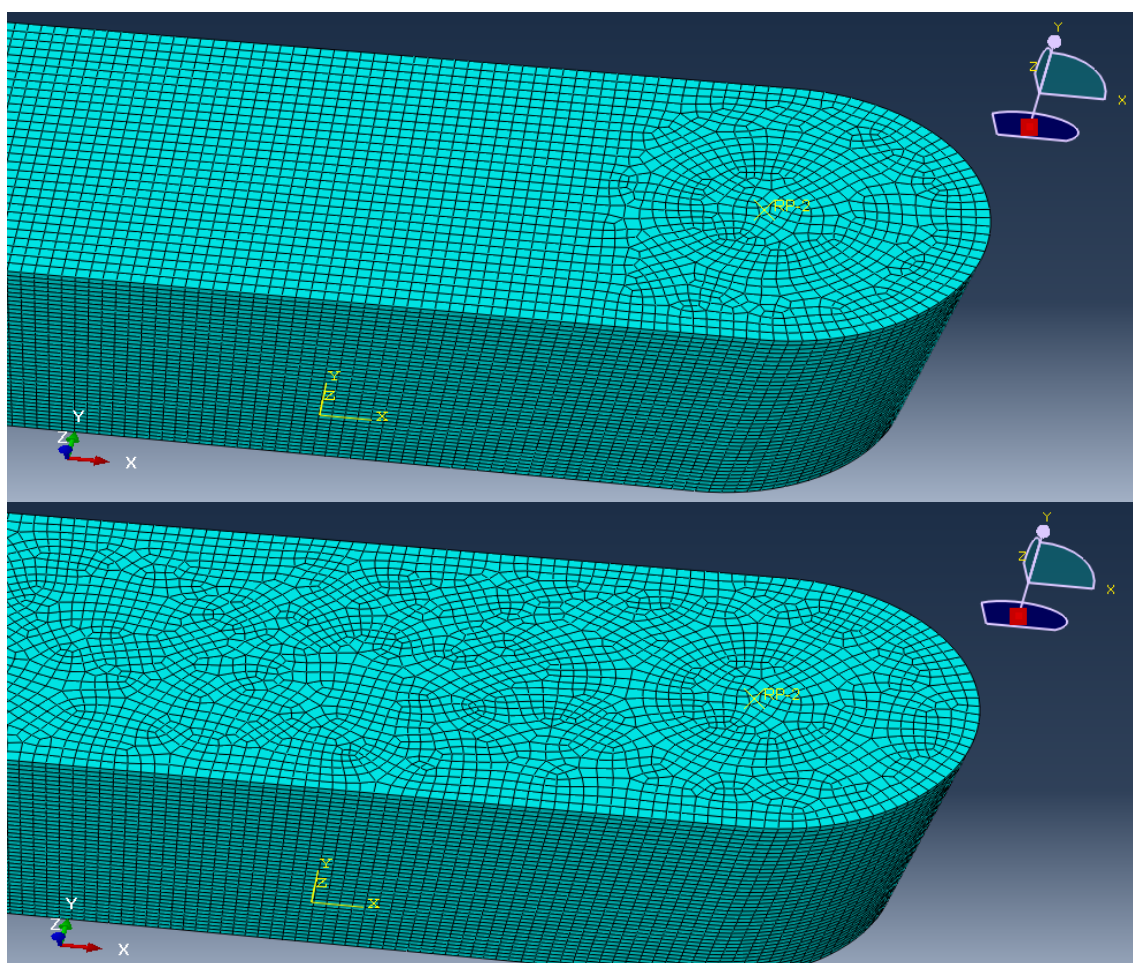


Figura 63. (Arriba) malla estructurada en todo el componente, como consecuencia de la utilización de las líneas de partición (solución final), relación de aspecto de 1.06. (Abajo) malla desestructurada, como consecuencia de la desestructuración del extremo derecho del componente, si no limitamos esto se propagará por el resto del componente, disminuyendo la calidad del mallado, y por tanto de la simulación, relación de aspecto de 1.1.

Se observa cómo, la circunferencia del extremo hace que la malla no esté perfectamente estructurada, es decir, la sección circular del extremo hará que la malla de desestructure en todo el componente. Esto se comprueba verificando el jacobiano y la

relación de aspecto en ambas mallas. Teniendo en cuenta jacobiano y relación de aspecto de valor unitario es un cubo perfecto. Por ello, para llegar a la solución anterior se crea una línea de partición, como se muestra en la siguiente imagen:

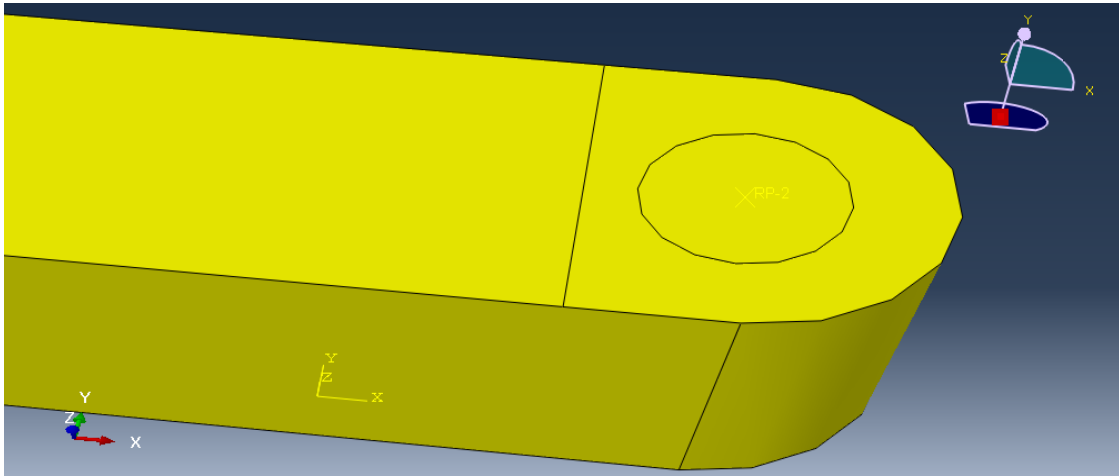


Figura 64. Líneas de partición creadas para evitar la propagación de la desestructuración.

Además de deben crear secciones adicionales, para definir las condiciones de contorno y cargas, esto se muestra en la siguiente imagen

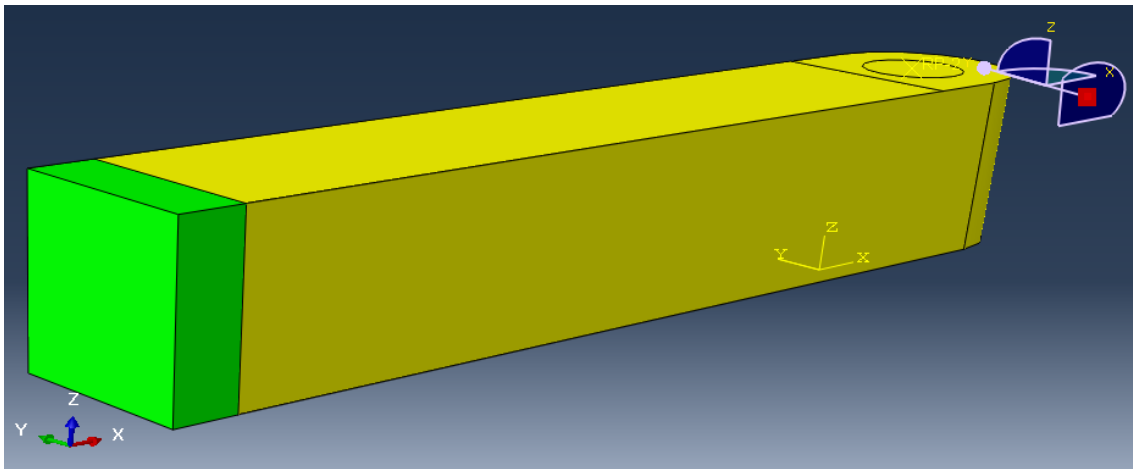


Figura 65. Secciones y partes creadas para facilitar la asignación de cargas y condiciones de contorno

Así, la visualización general de la malla completa queda como se sigue:

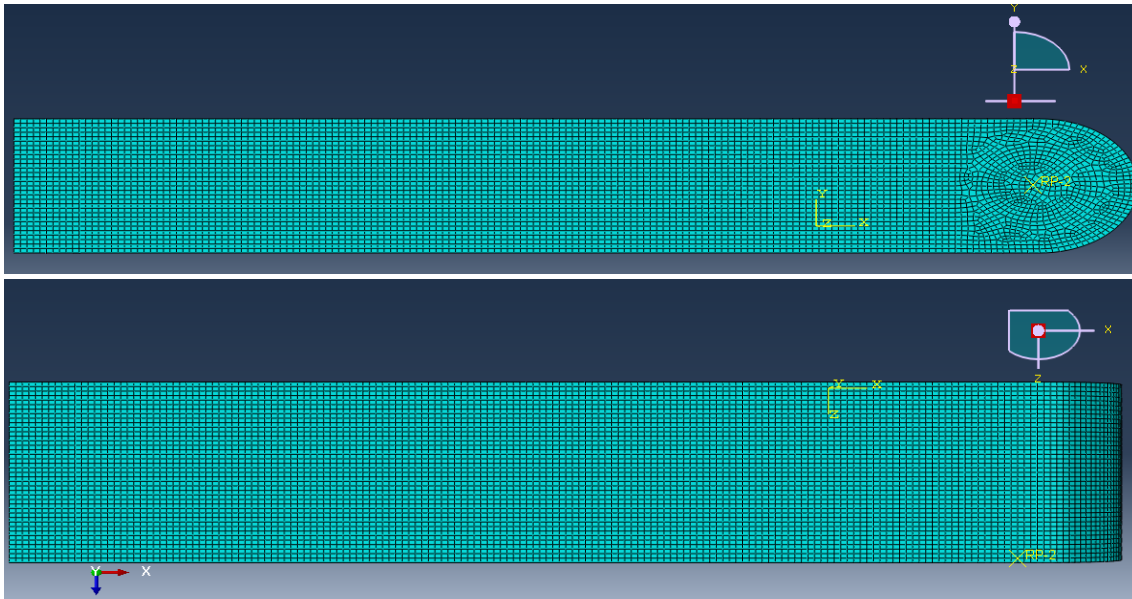


Figura 66. Vistas en alzado y planta de la malla generada.

A continuación se detallará los elementos utilizados, así como la semilla utilizada en el mallado.

14.1.7.1 Elementos utilizados

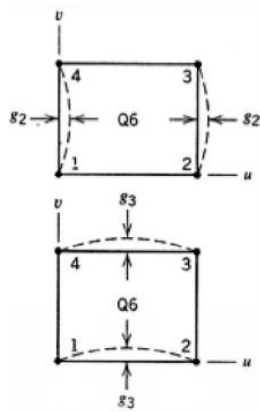


Figura 67. Elemento 2D, Q6, rectangular con adición de modos incompatibles.

Los elementos utilizados son de 8 nodos con funciones de forma lineales con modos incompatibles, ya que como se ha estudiado en la asignatura de *Métodos Avanzados de Cálculo en Ingeniería Mecánica* (Collado, 2015) e *Integridad Estructural en elementos Mecánicos* (Collado) son los que mejor se adaptan a situaciones en las que predominan la flexión, y este es un caso de ello. Dicho elemento, en la nomenclatura de Abaqus® es el C3D8I.

La malla utilizada, ha sido generada con un tamaño de semilla de 1 mm teniendo un total de 210720 elementos con una media de ángulo mínimo de 88,10°, una relación de aspecto de 1.06, por lo que está justificado el uso de modos incompatibles.

Es de destacar que, por equivalencia con los elementos rectangulares de cuatro nodos, si no se añade modos incompatibles, presentarán rigidez excesiva bajo comportamiento en flexión, siendo este también el principal defecto de los elementos hexagonales de 8 nodos, conocido tal efecto como bloqueo por cortante. Es por ello que se le añade los modos incompatibles, de forma que no tiene por qué ser compatible la

deformación con la tensión. Es decir, añade grados de libertad internos, para de esta forma permitir la curvatura entre nodos del elemento.

Por otro lado se corre el riesgo de que el resultado puede ser no válido, por lo que para evitar esto una vez obtenido el resultado se debe de analizar la compatibilidad entre elementos.

14.1.8 Criterio de unidades

Como se sabe, Abaqus® no requiere los parámetros de entrada con unidades específicas, sino que el ingeniero que utiliza dicho software debe de ser consistente con las unidades con las cuales se realiza el cálculo. Para este caso se ha considerado el criterio de unidades que se muestra en la siguiente imagen.

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10 ³ kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Figura 68. Criterio de unidades seguido en la simulación.

14.1.8.1 Estrategia

Como estrategia para realizar la optimización, se tendrá en cuenta la suma total para el volumen y la energía (strain energy). El objetivo principal en los problemas de optimización estructurales es minimizar la deformación o flexibilidad de la estructura, con unas condiciones de contorno prefijadas. También será esta una premisa para la optimización en componentes aeronáuticos, pero siendo la característica más importante la optimización de la masa o volumen de dicho elemento.

14.1.8.2 Funciones objetivo

Por lo anterior, en lugar de escoger como función objetivo, minimizar la energía de deformación, es decir, la energía de deformación es la energía almacenada por un

cuerpo debido a su deformación se optimizará la masa. Por lo tanto, al minimizar la energía de deformación lo que se busca es minimizar los desplazamientos.

El sistema optimizado, tendrá un mejor aprovechamiento de la energía de deformación, tendiendo a que esta sea mínima. Esto ya ha sido estudiado como métodos energéticos en régimen elástico en las asignatura mencionadas (Collado, 2015) (Collado).

Como restricción inicial se considera que el volumen debe de ser menor o igual a un 30% del volumen total

Se puede destacar que las condiciones de contorno y las zonas de carga se han ‘congelado’, ya que ellas deben de permanecer tal y como están en el tocho de partida. Otro criterio para la optimización es que sea desmoldeable en dirección vertical (eje y) conforme la Figura 66, asignándole un ángulo de desmoldeo de 2° .

14.1.8.3 Supuestos de carga RPAS 2-8 kg

14.1.8.3.1 Cargas extremidad

Los datos eléctricos del motor han sido estimados del ensayo en banco del motor con una determinada hélice 12.5.4.1.1 Curvas características del motor, página 61.

.1209 g es el empuje máximo analizado con la configuración motor Hextronik DT700 con hélice APC 12x4,5'' (analizado anteriormente en Figura 45)

14.1.8.5.1.1. Empuje del motor vertical

Carga situada en el eje de rotación del motor. Vertical y hacia arriba. El valor se estima mediante el peso del vehículo considerando el número de extremidades de este. Por lo tanto, al ser un vehículo de 4 extremidades cada una deberá soportar dicha masa, 1209g, pero se considera un factor de seguridad de 1.6, quedando la carga mayorada a 2 kg, lo que es equivalente a 19.62 N.

14.1.8.5.1.2. Vibración de hélice

Se puede despreciar suponiendo hélice perfectamente calibrada, hecho que no es verdad. Se podría realizar un estudio de su influencia. Se propone como trabajo futuro.

14.1.8.5.1.3. Par de giro originado por el motor

Si es un vuelo totalmente estacionario, en equilibrio, no se produce aceleraciones en sus motores, pero el régimen de giro de estos, cambiaría, en un mismo vehículo, de la carga de pago que le acoplemos.

Por lo tanto, se calculará el par de giro máximo, la mejor forma de determinar el par de giro es mediante ensayos en banco, ya que se podrá determinar el overshoot que se produce al demandarle una aceleración brusca al motor. Se puede estimar con cierto error este overshoot con la potencia de pico que realiza el motor al exigirle un cambio en su régimen de giro.

En este caso se estima analíticamente, dejando para trabajo futuro la fabricación de un medidor de par para motores de pequeñas dimensiones.

De forma estacionaria, si el motor trabaja a su máxima potencia, se tendrá un par de giro que se indica a continuación. Donde la potencia que nos indica en el ensayo del motor es 180W (sección 12.5.4.1.1 Curvas características del motor, página 61), potencia que se verá reducida a efectos del cálculo del par por el rendimiento del motor, que en este caso se estima en un 65%, por lo que la potencia que produce el par de torsión de flexión lateral del brazo es 117 W, que en nuestro caso, considerando el mismo coeficiente de seguridad de 1.6 se mayor a 187.2 W

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{187.2 \text{ W}}{6030 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}} \rightarrow \boxed{M = 0.296 \text{ N} \cdot \text{m} = 296.5 \text{ N} \cdot \text{mm}}$$

El motor se ancla al brazo mediante tornillos. Por lo que para su cálculo se pueden modelar estos o bien suponer que este par se distribuye en la superficie sobre la que se asienta el motor, ya que cada motor dispone de distintas distribuciones de tornillos. En nuestro caso se ha considerado esta última opción.

14.1.8.5.1.4. Carga placa central inferior

La carga estará situada en los tornillos de la parte inferior donde se ancla la placa central inferior, donde a su vez se ancla la carga de pago. Por lo tanto, si no se modifica

el diseño se ejercerá una componente de tracción en el amarre de la extremidad con un valor máximo estimado mayorado de $2 \text{ kg} = 19.62 \text{ N}$.

Los 4 tornillos que sujetan la extremidad estarán empotrados, pero no en todos sus grados de libertad.

Los tornillos superiores se considerarán empotrados en todos sus grados de libertad. Se puede inducir una precarga o apriete para estos tornillos.

Los tornillos inferiores se consideran empotrados móviles en la dirección z. Siendo esta dirección la perpendicular al plano en el que se sitúa el vehículo.

14.1.8.5. Modelización de las cargas en Abaqus®.

A continuación, se muestran cómo se han modelizado y simplificado las cargas anteriores en su implementación:

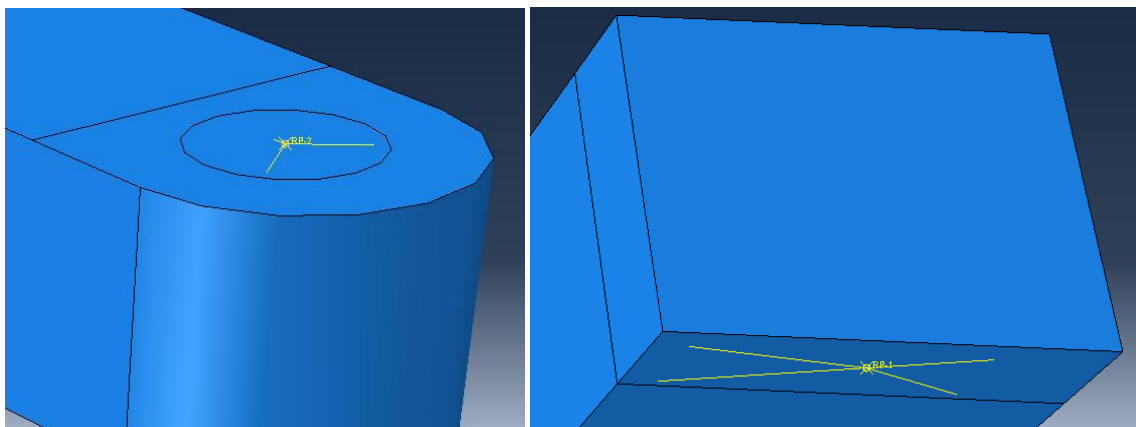


Figura 69. Kinematic Coupling para las cargas puntuales aplicadas sobre superficies. La fuerza se aplicará en el punto de referencia (Reference Point), arrastrando toda la superficie a la que se asocia. Para la carga vertical ascendente y par motor originada por el empuje del motor (Izquierda). Para la carga vertical descendente originada por la placa central del vehículo, donde se aloja toda la carga de pago (derecha).

ascendente, de valor 19.62 N y el par motor de 295.5 N . El peso de la placa central máximo también es de 19.62 N , que coincide con la fuerza de empuje de los motores, considerando que la masa de la placa inferior del vehículo es despreciable.

En la siguiente imagen se muestra la modelización de las cargas que se ejercen sobre ella en la parte interior de esta

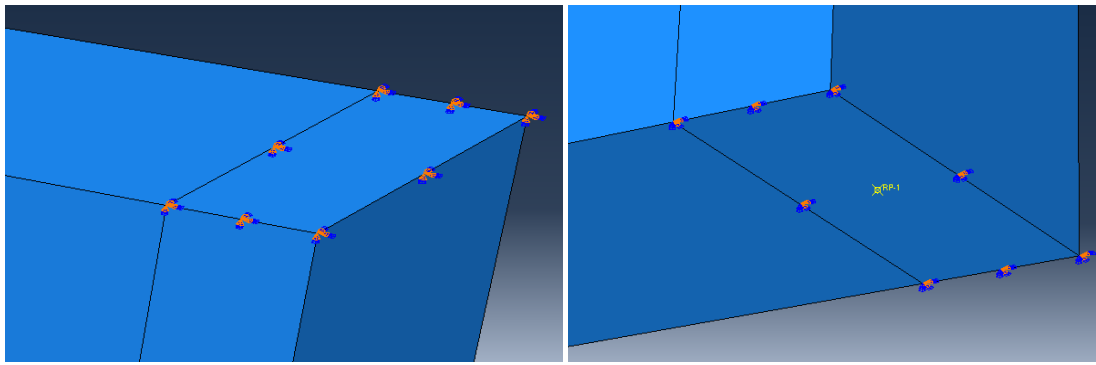


Figura 70. La parte superior que ancla con la parte central se considera empotrada (izquierda). Mientras que la parte inferior debe tener permitido el movimiento en el eje vertical, ya que sufrirá un alargamiento como consecuencia de la masa de la placa central y la carga de pago (derecha).

14.1.8.6. Modelización de las condiciones de contorno en Abaqus.

Lo anterior, como se muestra es una simplificación de unos tornillos que en la realidad son los que soportan la extremidad. En la imagen Figura 70 también se muestra las condiciones de contorno simplificadas.

14.1.9. Resultados

Tras 20 iteraciones realizadas, se muestran los resultados obtenidos.

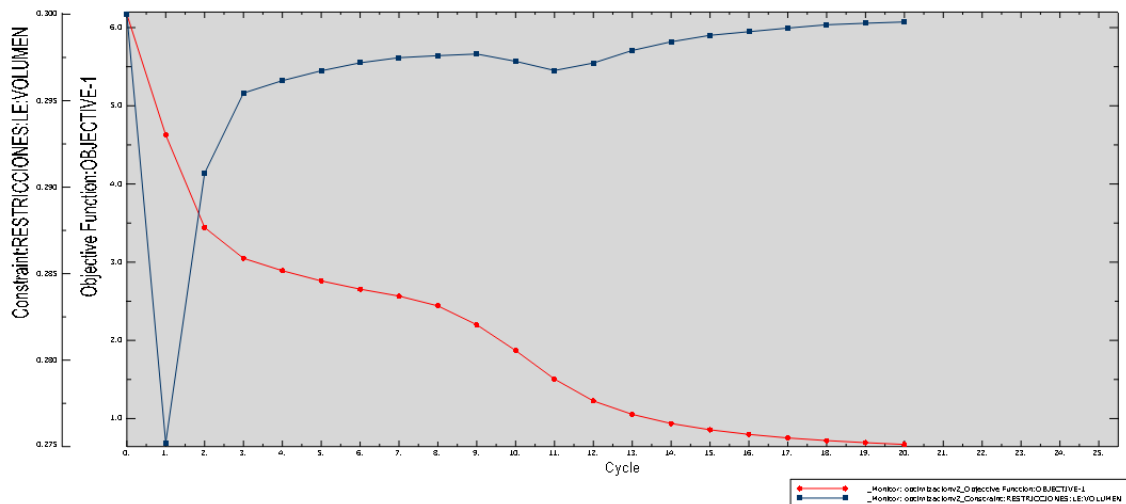


Figura 71. Convergencia de las funciones objetivo y restricción respecto al número de ciclos. En rojo se muestra la función objetivo y en azul la restricción de volumen.

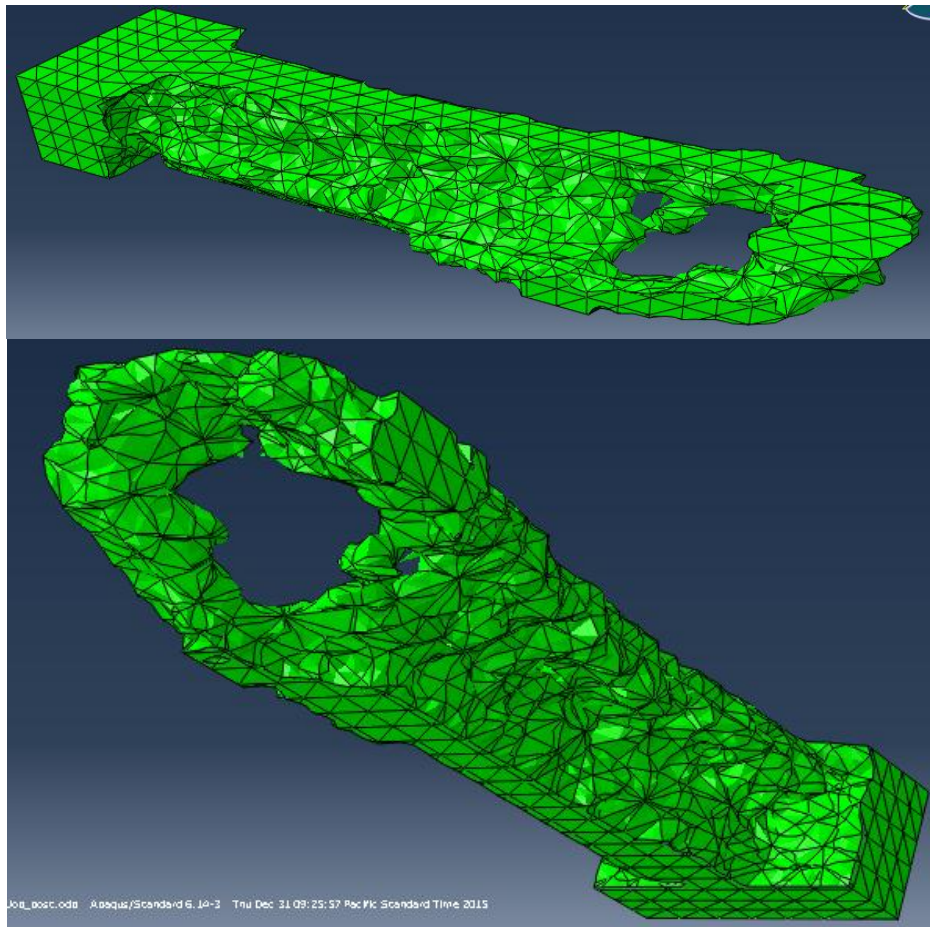


Figura 72. Perspectivas de la optimización resultante.

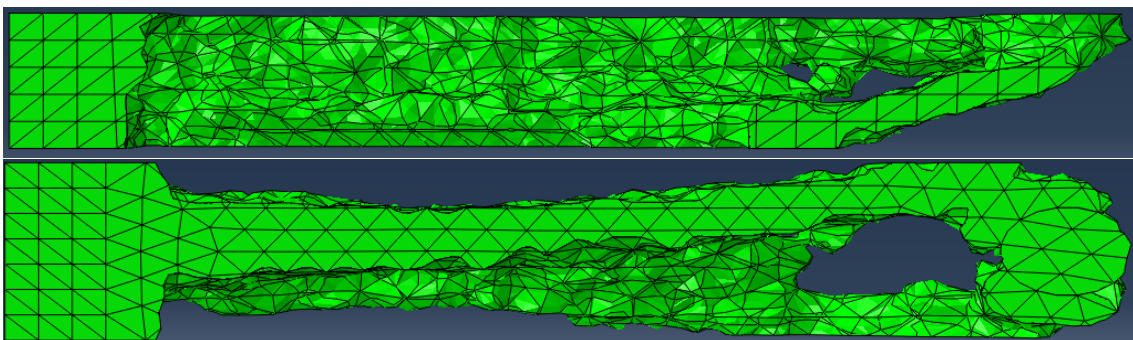


Figura 73. Se muestra como la geometría óptima en algunos puntos de la optimización excede los límites del tocho, por lo que se debería tomar un tocho de partida con una dimensión mayor en la dirección z, siendo el principal inconveniente el empeoramiento de la aerodinámica en la estructura.

Se aprecia cómo se ha generado esa forma para contrarrestar el momento que nos genera el motor.

14.1.10. Modelado del componente

El objetivo de realizar diseño del componente es que esta sea una geometría que se pueda fabricar con un costo reducido. Ya que no tiene sentido fabricar con un acabado rugoso como el que se obtiene como resultado de la optimización topológica, ya que además de ser mucho más costoso de fabricar, menos estético y menos resistente, al ser defectos los cuales favorecerán la formación de grietas y por tanto la fractura. Es por ello, que, considerando las dimensiones de la estructura obtenida, se modela en Catia® usando el módulo de superficies y sólidos conjuntamente (Gallego Álvarez, y otros, 2015) (Usuarios, 2015), obteniendo un resultado como el que se muestra

Se deja como trabajo futuro el análisis de la aerodinámica de la geometría propuesta.

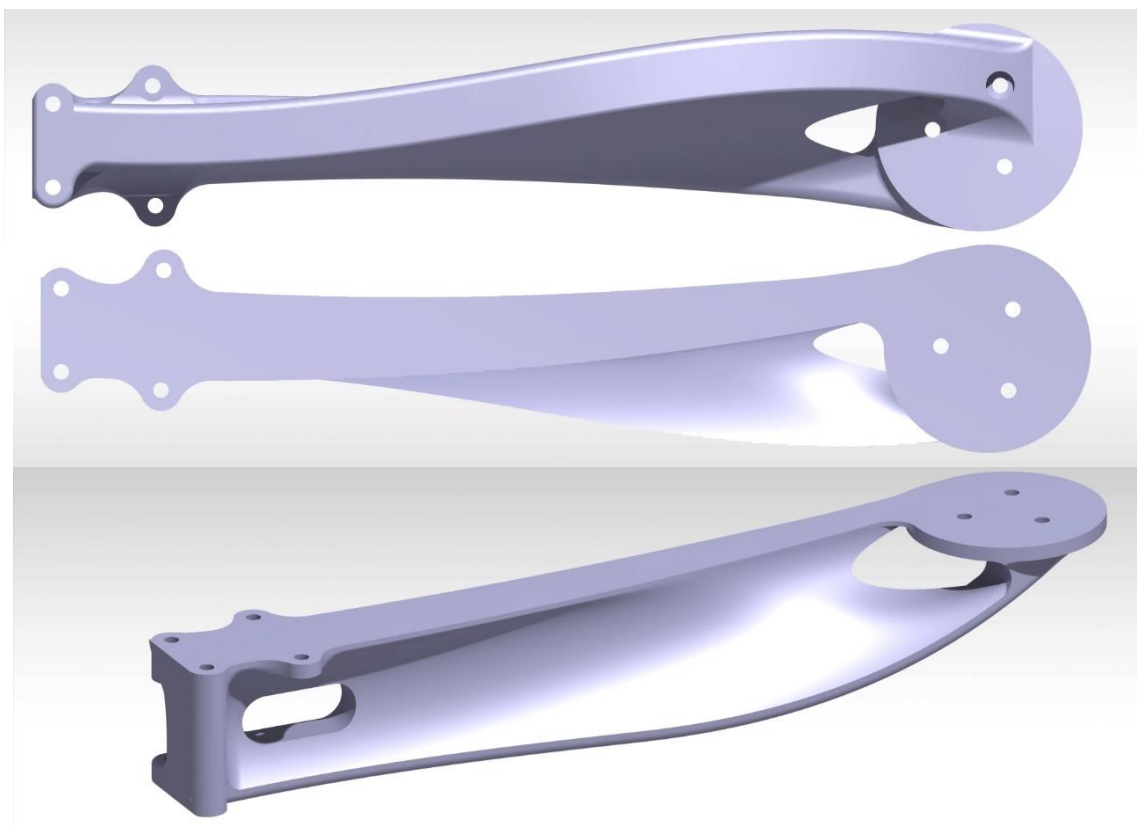


Figura 74. Diferentes perspectivas del model CAD de la extremidad.

15. ANÁLISIS DE FLUJOS DE AIRE

En primer lugar se analiza lo ocurrido con la turbina y el deflector de forma aislada para posteriormente analizar lo que ocurre de forma más precisa, cuando se sitúa bajo la estela del vehículo.

El proceso seguido en todas las simulaciones es común y ya ha sido estudiado en la asignatura de (Medina, 2016). La malla, será creada a partir de una superficie generada con Catia®, guardada con extensión *.igs e importada en el módulo Meshing de Ansys ICEM CFD®, para posteriormente realizar la simulación en Ansys Fluent®, y realizar el Post-procesado en Fluent®. En todas las simulaciones llevadas a cabo se revisa la convergencia de esta, además de conservación de los flujos másicos.

15.1. Estela en el vehículo.

15.1.1. Generación de geometría

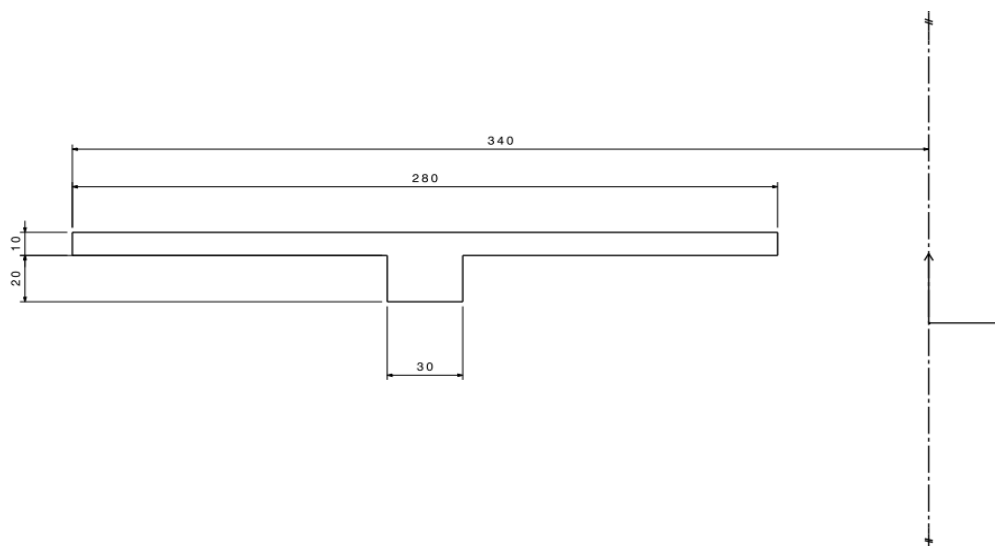


Figura 75. Principales dimensiones de la hélice y motor a malla. Modelo en Catia

Como primer caso se analiza la estela que produce el vehículo aéreo, sin ningún tipo de dispositivo que interfiera en su trayectoria. Para ello se crea una zona de estudio de 5 x 5 m, para una sección transversal simplificada como se muestra en la figura anterior (geometría simplificada de los elementos a analizar).

15.1.2. Malla

Como se ha mencionado anteriormente, al ser una malla sencilla se utilizará el Módulo de Ansys® denominado Meshing®.

Para facilitar la identificación de las condiciones de contorno se hará en geometrías independientes, para posteriormente poder seleccionarlas en el software generador de la malla, agruparlas e indicarle un nombre, para finalmente poder asignarle en Fluent las ecuaciones para cada condición de contorno.

Las condiciones de contorno a aplicar serán

- Wall
- Velocity inlet

La elección de la primera condición de contorno es clara, tipo pared, con velocidad en la pared de 0, es decir, no deslizamiento, además de pared estacionaria.

La segunda condición se considera el resultado obtenido de la experimentación se conoce la velocidad de salida de la turbina con tobera y la velocidad de salida de las hélices principales. Para ello, ver prueba experimental de la turbina a máxima potencia, sección 12.6.2.1.1 Estimación teórica y ensayo experimental, página 71.

Otra prueba experimental se realiza con el vehículo en vuelo, obteniendo en este caso un valor máximo de 11.3 m/s, pero en las simulaciones se ha considerado un valor de 10 m/s, ya que dicho valor máximo de velocidad no es homogéneo en toda la superficie que barre la hélice, como se analizó en la Figura 48. Por ello un valor ligeramente menor es más realista.

La geometría a mallar consistirá en la superficie por la cual circula el fluido, como se muestra en las Figura 77, Figura 78, Figura 79, Figura 80.

Para realizar la malla se considera que:

- Malla tetragonal. Para ello se ha de simplificar la geometría.
- Refinamiento de malla en aquellas zonas donde se presente alto gradiente en alguna de las propiedades del fluido. Evitando utilizar altos recursos computacionales.

- Selección de las condiciones de contorno con una misma propiedad o ecuaciones. Para que posteriormente se puedan identificar en software de análisis.

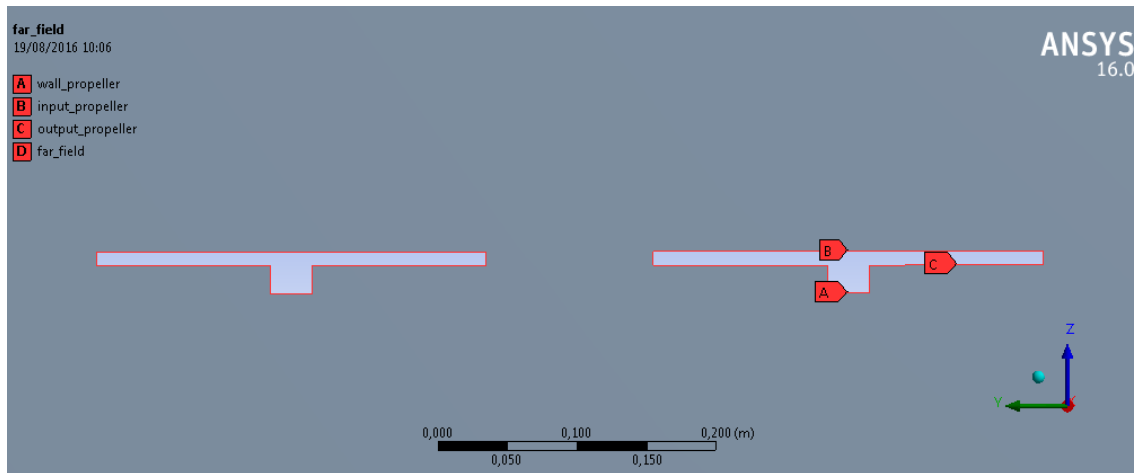


Figura 76. Se generan distintas zonas para poder identificarlas más fácilmente posteriormente en el software de cálculo.

En esta simulación se han identificado cuatro zonas, la primera de ellas de tipo pared, dos de velocity inlet, y una como far field.

Estas zonas se han diferenciado por la siguiente justificación:

- Pared de la hélice, se considera pared de hélice como los dos extremos de esta, además del motor central. Esta simplificación es coherente si tenemos en cuenta el flujo que se genera en una hélice, Figura 77.

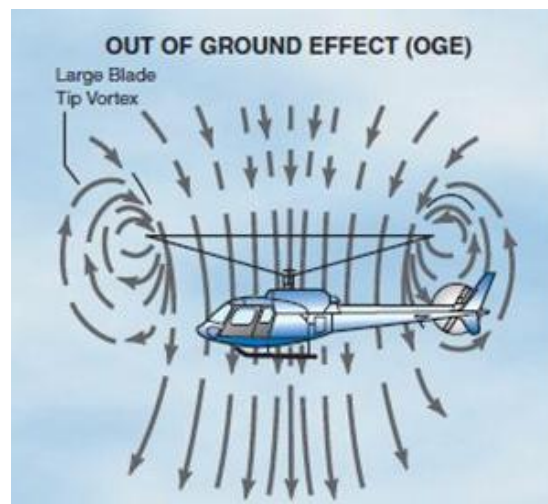


Figura 77. FAA. Course Name: ALC-104: Helicopter - General and Flight Aerodynamics. Patron de circulación de aire o líneas de corriente.



Figura 78. Boundary Condition tipo wall

- En la parte superior e inferior de la hélice se considera como entrada en la parte superior y salida en la inferior. Por conservación el flujo másico



Figura 79. Boundary Condition tipo velocity inlet (caso A o superior). En la parte inferior se repite el tipo velocity inlet, pero con velocidad negativa, por lo que será en la misma dirección que la superior. superior debe de ser igual al inferior.

- El far field será donde esté el campo fluido, es decir, la superficie donde se analiza el flujo másico. Corresponde con la parte restante de la geometría, Figura 80.

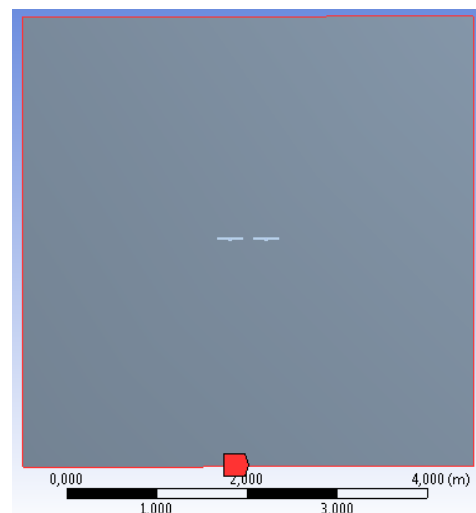


Figura 80. Far field.

Definido lo anterior se escoge el tipo de elemento, se utilizan elementos Quad con 4 puntos de integración, teniendo 62920 elementos.

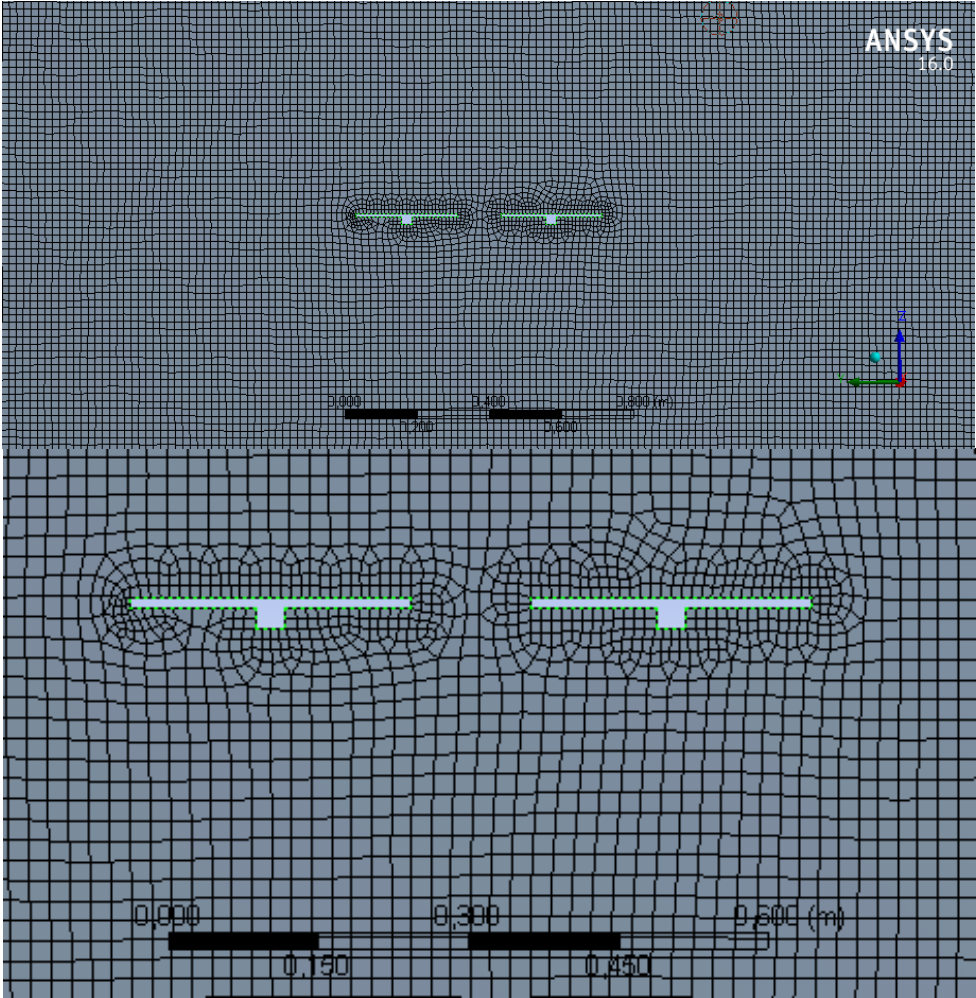


Figura 81. Malla generada, 62920 elementos.

Además es necesario el chequeo de la calidad de la malla:

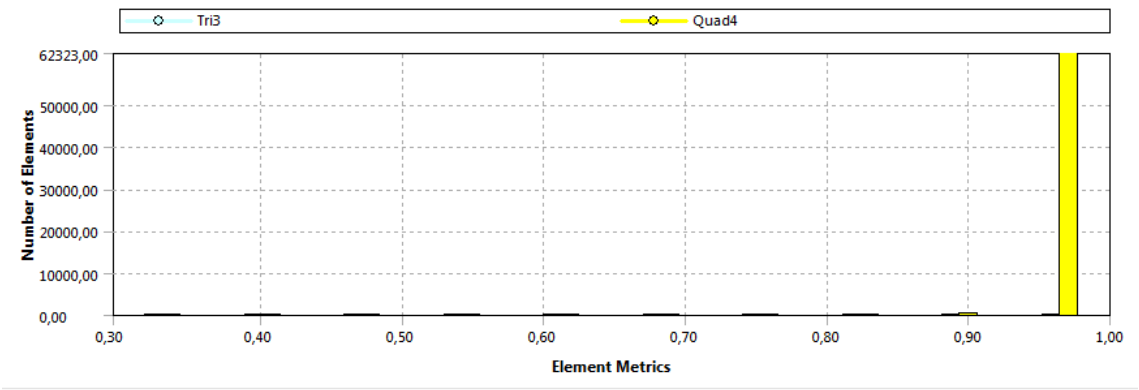


Figura 82. Número de elementos Quad y Tri.

Además, el jacobiano y la relación de aspecto son cercanos a la unidad, por lo que la malla es válida.

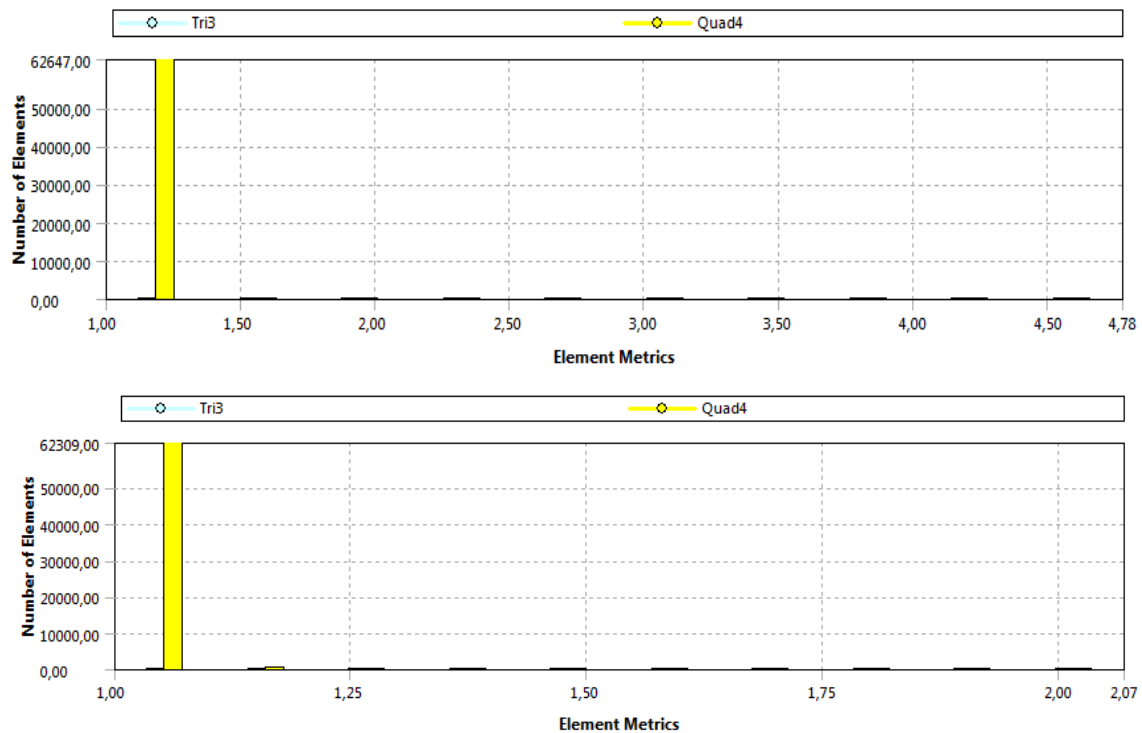


Figura 83. Jacobiano (arriba), relación de aspecto (abajo). Ambas muy cercanas a la unidad

15.1.3. Simulación.

Una vez que se tiene la malla creada, esta se importa en Fluent®. Para su resolución un esquema SIMPLE, con primer orden para la ecuación de conservación del momento. Ya que se mejora la convergencia con respecto a métodos acoplados.

Así se obtienen los siguientes resultados:

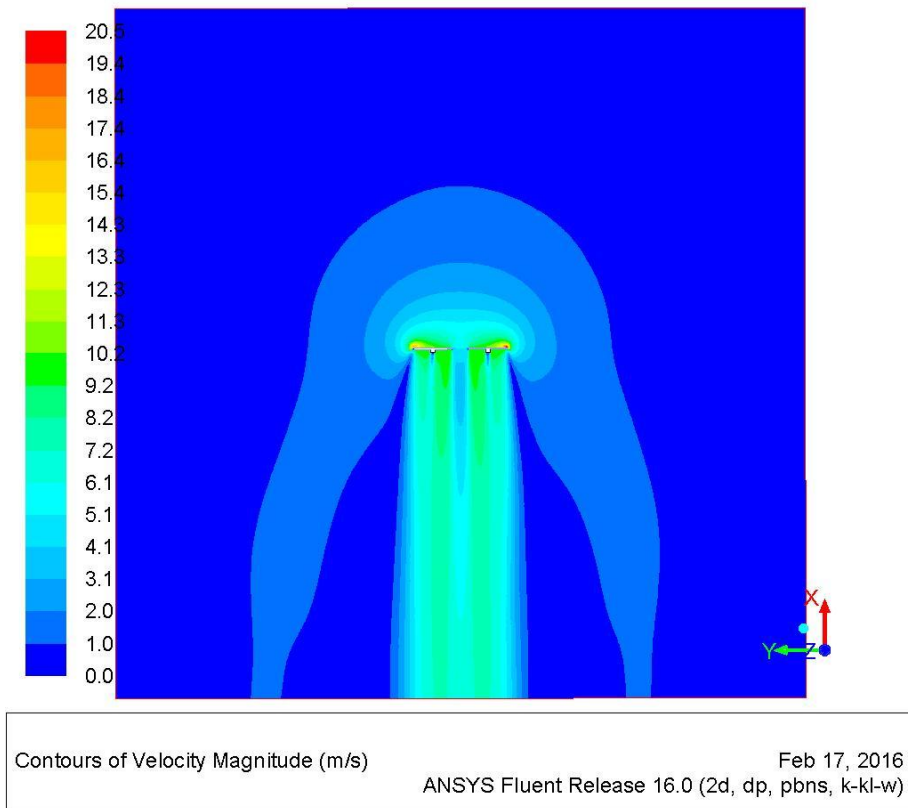


Figura 84. La velocidad máxima alcanzada es mayor que la suministrada por el vehículo. Esto es consecuencia de la simplificación de las condiciones de contorno. Siendo irrelevante para nuestro objetivo, ya que es en puntos concretos. Se muestra en detalle en la siguiente imagen.

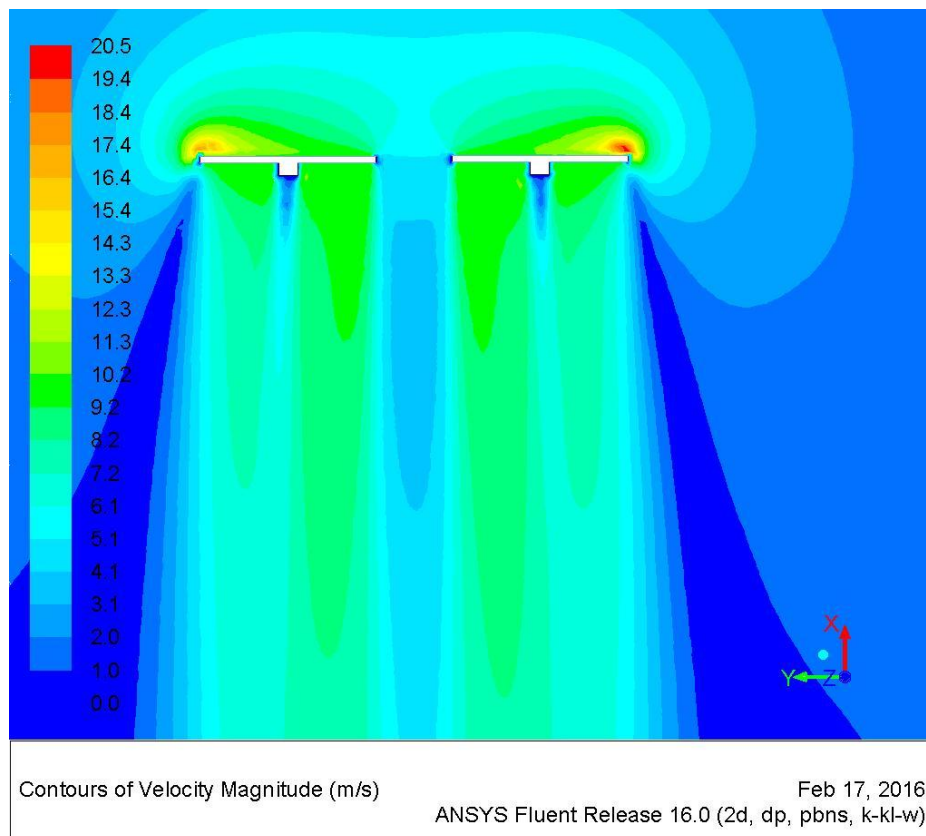


Figura 85. Detalle de la velocidad máxima obtenida. Ello es consecuencia de considerar los extremos de la hélice como paredes verticales, por las cuales no puede ser atravesado por flujo

másico, además de la capa límite existente en esta condición de contorno (por ello se tiene en los extremos de las hélices velocidad nula, al ser una pared con capa límite). Para evitar esto se puede ejecutar con las condiciones de contorno como se muestran en la Figura 77.

Además, en las figuras anteriores se muestra como en la parte interior de las hélices la estela generada tiene mayor velocidad, como consecuencia de que el gradiente es menor. Mientras que en los extremos se sitúa el aire en calma. Justo en el eje de simetría del vehículo se tiene una velocidad aproximada de 2 m/s, mientras que en el exterior se tiene 0 m/s.

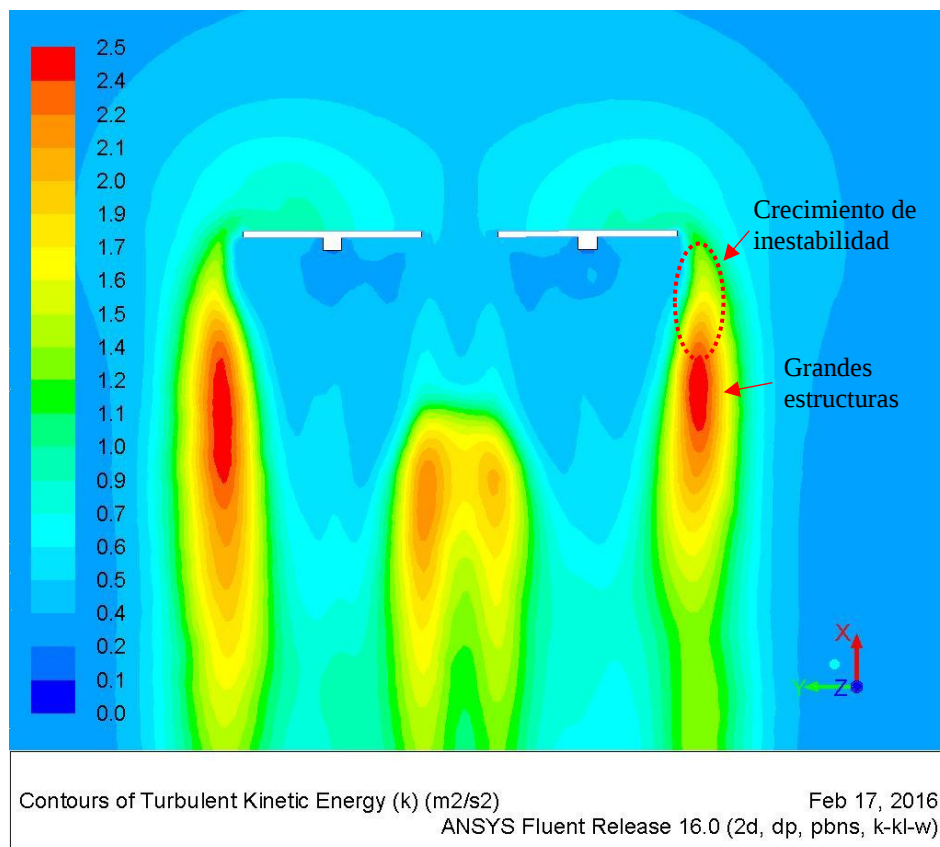


Figura 86. Energía cinética turbulenta (TKE), las zonas que nos marca en rojo será más probable la generación de turbulencia, siendo un resultado coherente, ya que en los extremos del vehículo el fluido se encuentra con velocidad nula (Figura 85) y en un espacio reducido pasará aproximadamente a 9 m/s.

La energía cinética turbulenta es la raíz cuadrada de la energía cinética por unidad de masa asociada con los vórtices en flujo turbulento (root mean square, RMS).

Es decir, existe un alto gradiente de velocidades en los extremos de la estela que produce el vehículo. Si se relaciona con problemas similares como la inyección de un chorro (Understandig jet noise, 2010) vemos que se aprecian estructuras similares (no captadas en nuestra simulación con tal detalle, debido a la malla empleada y limitaciones computacionales)

Si vemos la vorticidad que se produce en una hélice de helicóptero tiene el aspecto que se muestra en la Figura 88:

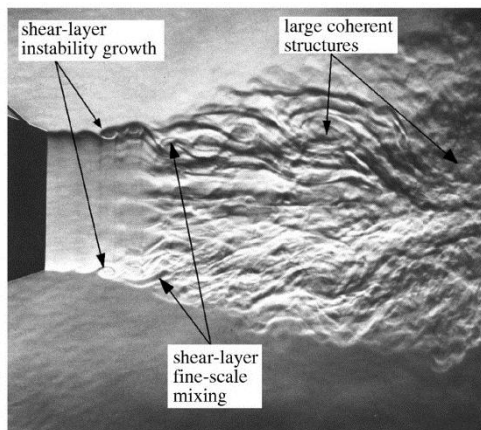


Figura 87. Similitudes con el problema estudiado. Estructuras generadas en la inyección de un chorro. (Understandig jet noise, 2010)

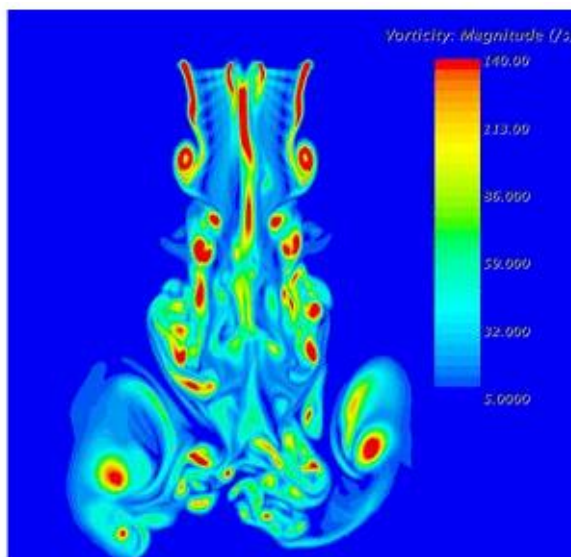


Figura 88. Magnitud de la vorticidad en estela producida por una hélice de helicóptero. Se aprecia un resultado similar al mostrado en la Figura 86 (Webinar)

15.2. Conjunto deflector tipo I con turbina

Una vez que se ha analizado el deflector, se realiza el estudio del conjunto final.



Figura 89. QX-Motor 64mm 12 blades Ducted Fan with 3500kV 3-4S Brushless motor. Con tobera y adaptador para ensayo en el banco (QX-Motor).

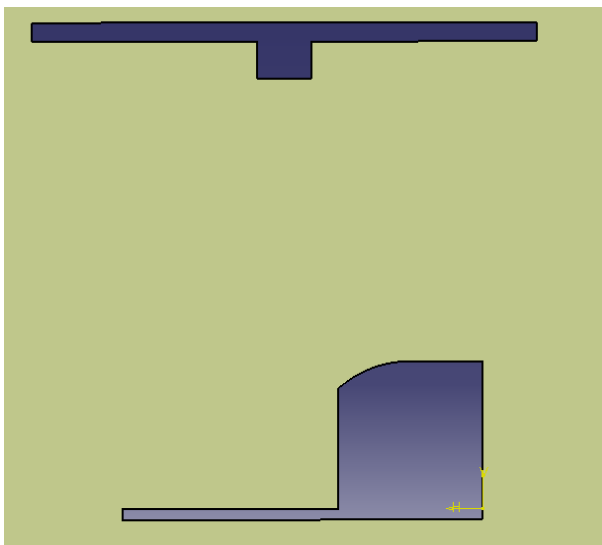


Figura 90. Posición deflector con geometría simplificada y origen de referencia considerado en todo el documento.

La simulación se realiza con el deflector completamente horizontal, (situación más desfavorable), con los motores a máxima potencia (UAV y turbina). Cuando el deflector se encuentre con cierto ángulo los momentos a los que se someterá el servomotor serán menores y por lo tanto soportará el esfuerzo no siendo necesario analizarlo.

Se considera conocido, mediante pruebas experimentales la velocidad de salida de la turbina con tobera y la velocidad de salida de las hélices principales (Sección 12.6.2.1 Turbina, página 70).

Las fuerzas resultantes esta vez tienen dirección vertical, de 4.83 N en sentido descendente, mientras que en la horizontal es de 6.36 N hacia la derecha. Este último valor es 2.9 veces mayor que el empuje que nos proporciona la turbina

sin la hélice superior (6.36N frente a 0.187g, ya que, al tener un flujo de aire entrante, que lo desvía de la hélice superior que ya lleva una velocidad, por lo que la fuerza en dirección horizontal es mayor que en el caso anterior.

Es decir, si se observa la Figura 91 el flujo de entrada ya se tiene una velocidad, aproximadamente de 18 m/s

En cuanto a la fuerza vertical tendrá sentido hacia abajo, aunque no es excesivamente grande, 4.83 N, ya que la propia turbina, como se muestra, absorbe el flujo de aire de la hélice que viene de la parte superior, por lo que por un lado se tiene la fuerza que hace el aire al impactar el deflector, y por otro lado se tiene la fuerza de succión al absorber la turbina el flujo de la hélice.

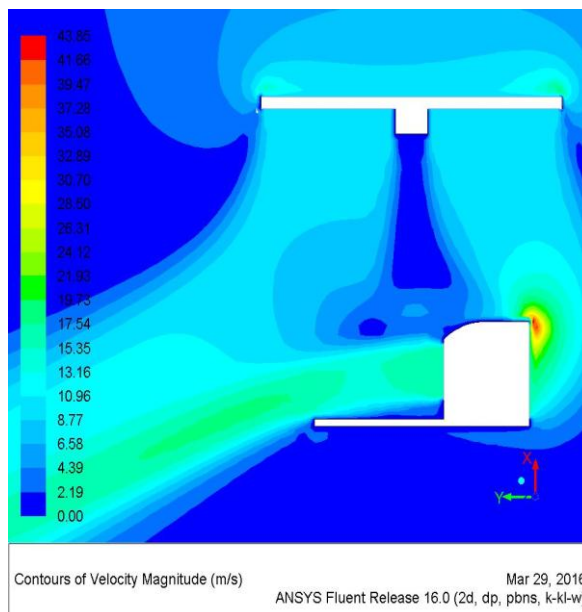


Figura 91. Velocidades del flujo.

Para asegurarnos que la solución esta convergida se elimina el criterio de parada, y se monitorizan los residuales, así como presiones en distintos puntos de estudio. Al ser una simulación estacionaria, sin intercambios térmicos, se consideran soluciones menores a residuales del orden de 10^{-4} .

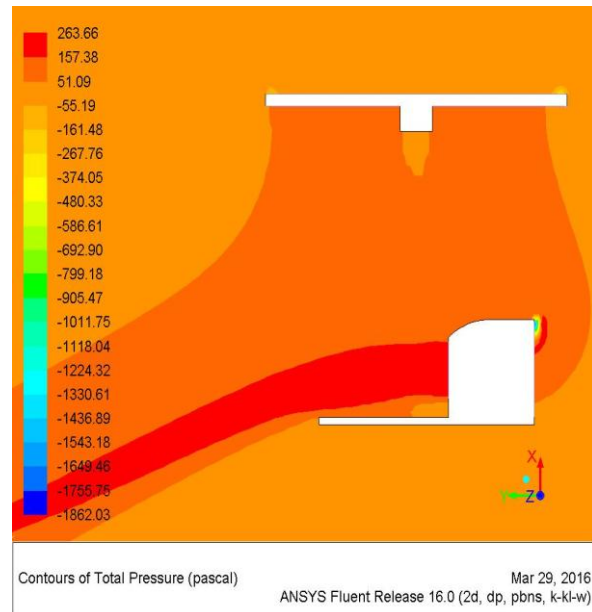


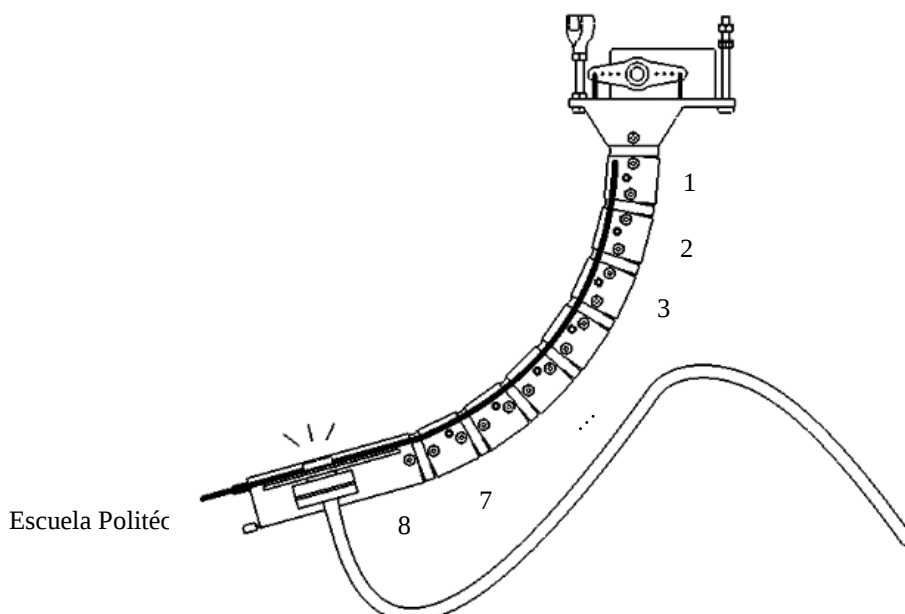
Figura 92. Presión total del flujo

15.3. Deflector tipo II

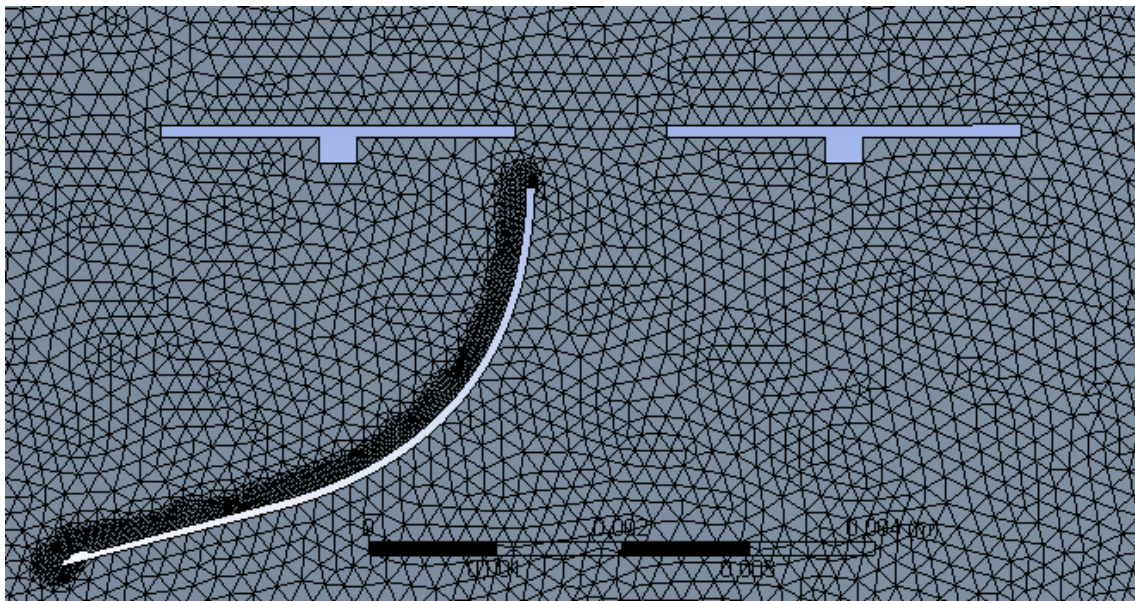
Se procede de forma similar que en el caso del deflector tipo I. Se realiza un análisis FEM y posteriormente una interpretación de resultados.

Además en este caso se analizará el servomotor necesario en dicho deflector, partiendo de la simulación realizada con Fluent®, que como en el caso anterior es necesario realizar una simplificación de la geometría.

Se modela las hélices, así como los motores, además de una superficie que simula el deflector. También se modela la boquilla del extremo, todo ello se mallará con elementos tetragonales, ya que esta geometría es más complicada que las tratadas anteriormente.



La malla generada tendrá el siguiente aspecto (**más información de la malla**)



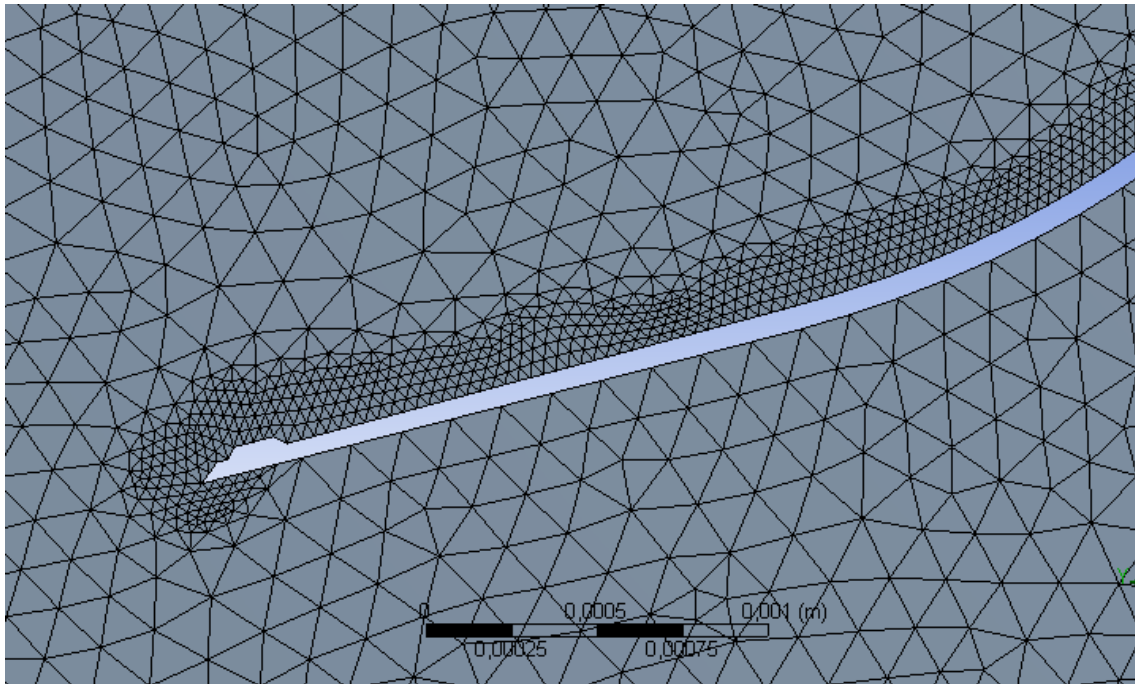


Figura 94. Malla realizada, en elementos tetragonales.

Así se tiene como resultado de la simulación:

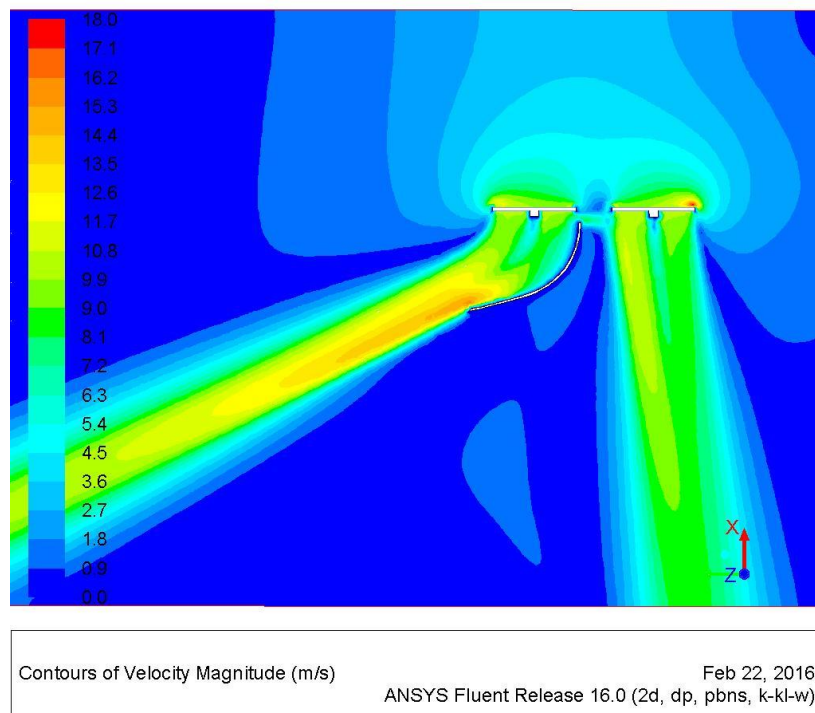
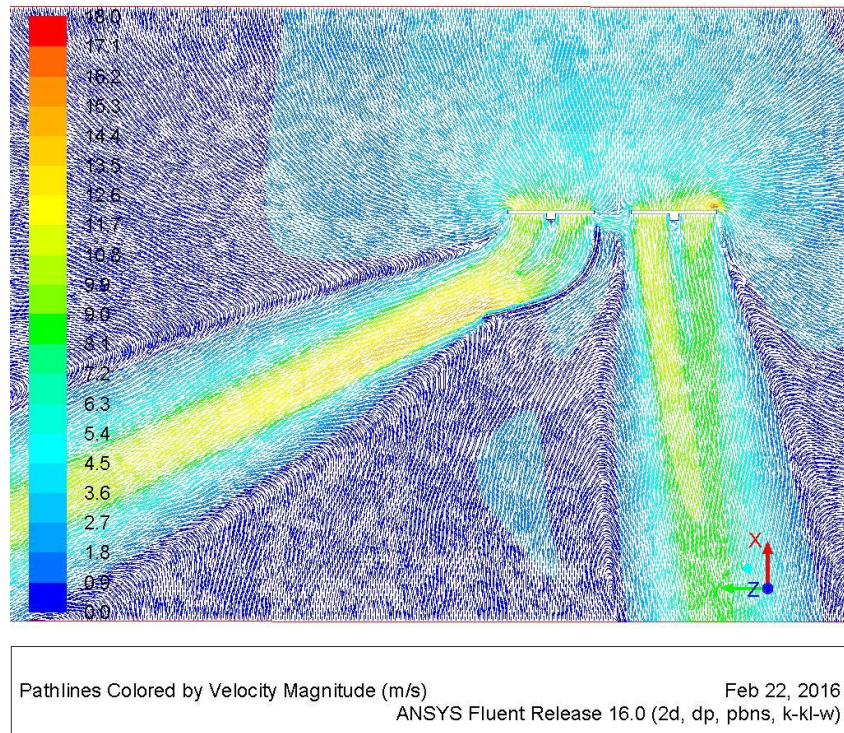
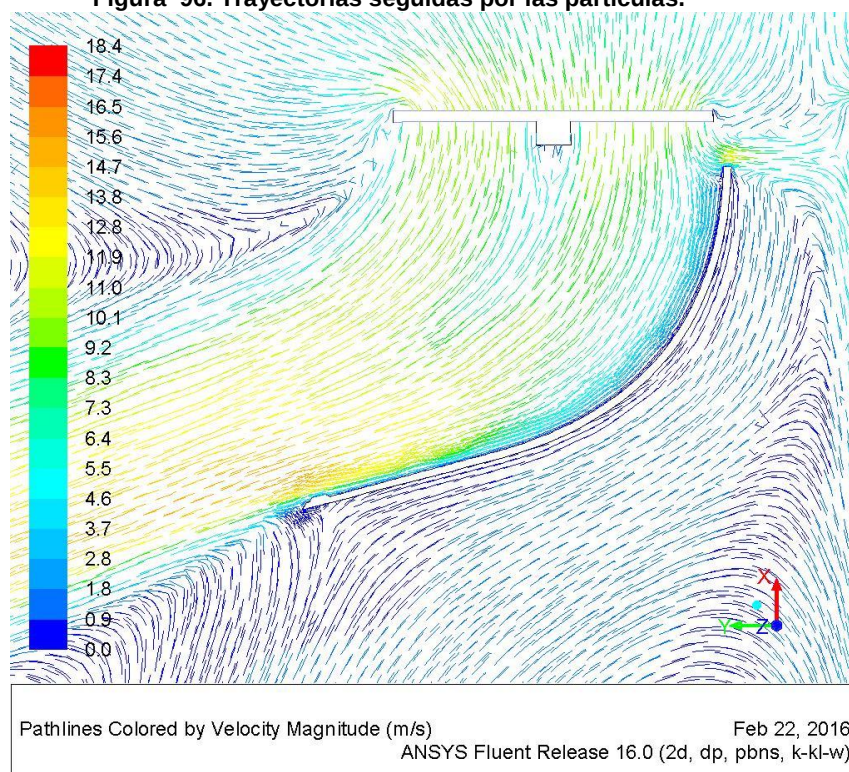


Figura 95. Velocidad obtenida en el sistema completo. En este deflector, como es normal, se obtiene una velocidad menor al anterior.

Anteriormente en el deflector tipo I la velocidad es de aproximadamente 24 m/s a 30 cm del deflector, mientras que ahora es de 12 m/s. Lo que supone una apreciable diferencia, pero en este caso no se requiere de energía auxiliar para alimentar la turbina.

**Figura 96. Trayectorias seguidas por las partículas.****Figura 97. Detalle de las trayectorias seguidas por las partículas**

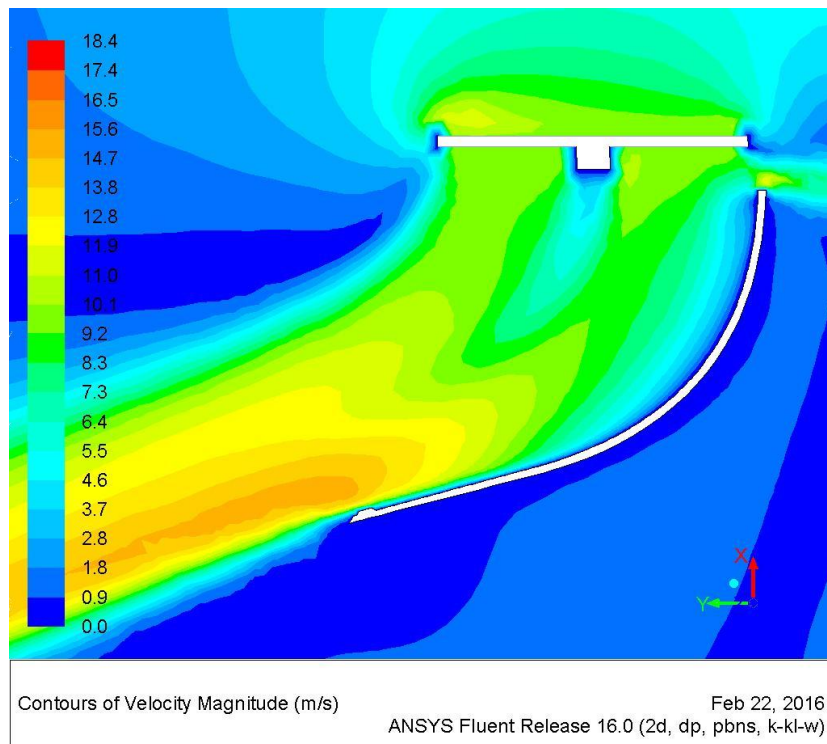
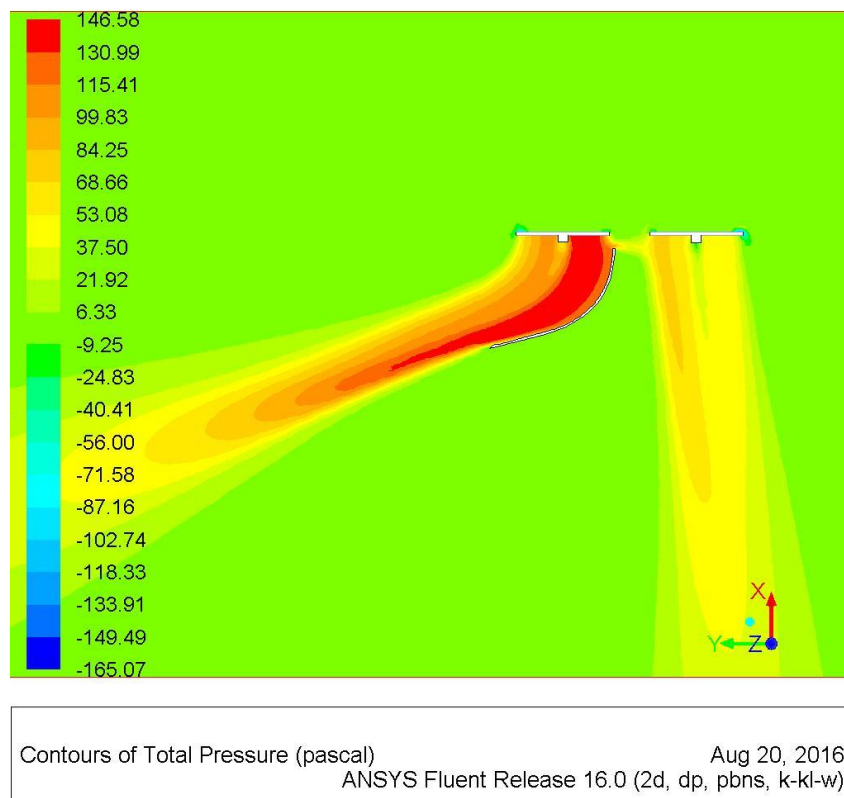


Figura 98. Detalle de la velocidad en el deflector. Se aprecia como al realizar el refinamiento de malla en las condiciones de contorno tipo pared del deflector se capta la capa límite.



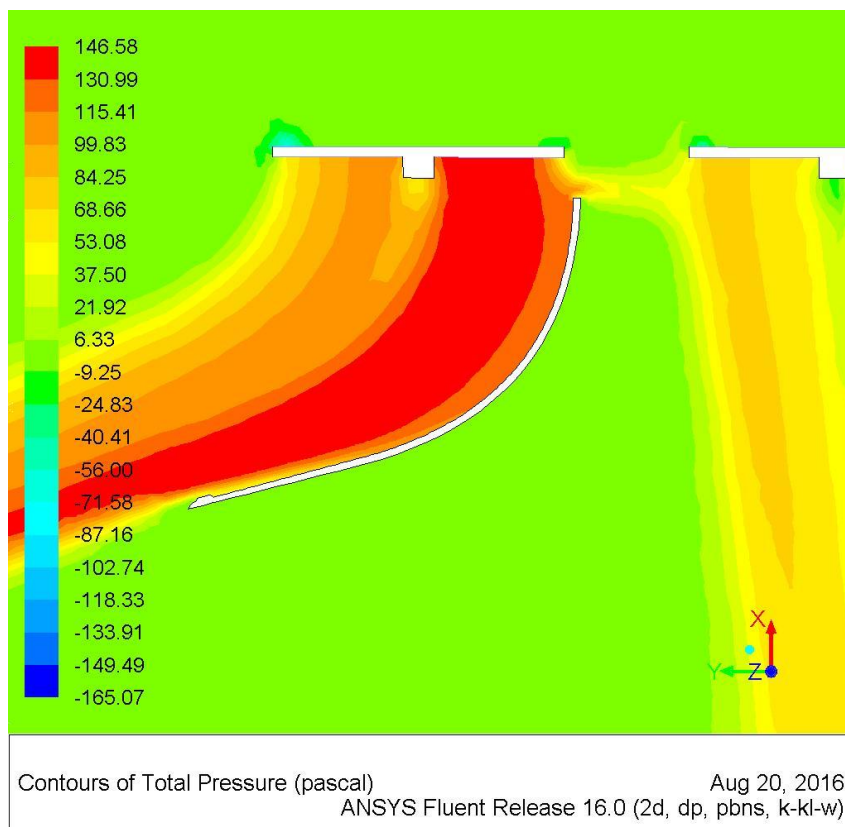


Figura 99. Distribución de presiones en el deflector. Se utilizará para el siguiente punto para calcular la tensión del tensor interno.

15.3.1. Estimación de la tensión del tensor

En este punto se pretende dimensionar el servomotor que acciona el deflector, para ello se debe de obtener la tensión que se genera en el tensor cuando el aire incide sobre él. Fluent® nos arroja un resultado para la resultante del deflector, es decir, la componente horizontal y vertical de todo el deflector es conocida, pero no sabemos dónde está aplicada dicha resultante. Por lo que existe la problemática que no se sabe el momento que se genera al no conocer la localización de la fuerza resultante.

Por tanto, como solución a este problema se realiza un desarrollo discretizado tomando como punto de partida las presiones. Es decir, de Fluent® se obtiene la distribución de presiones a lo largo del deflector, por lo que si se discretiza el deflector en las áreas que cubren los eslabones, se tendrá una presión aplicada en una superficie, que es igual a una fuerza resultante en el eslabón.

La suma de todas las fuerzas resultantes deberá de coincidir con la que nos aporta Fluent de manera directa, pero con la diferencia de que ahora si se sabe la localización de

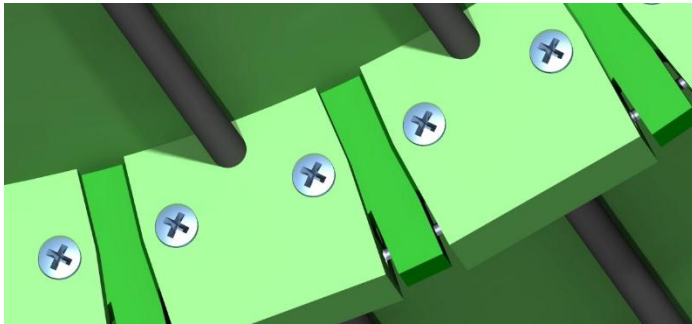


Figura 100. Ensamble de eslabones.

dicha fuerza. Por lo que de esta forma si se puede realizar momentos y calcular la tensión del cable que mantiene con dicha forma al deflector.

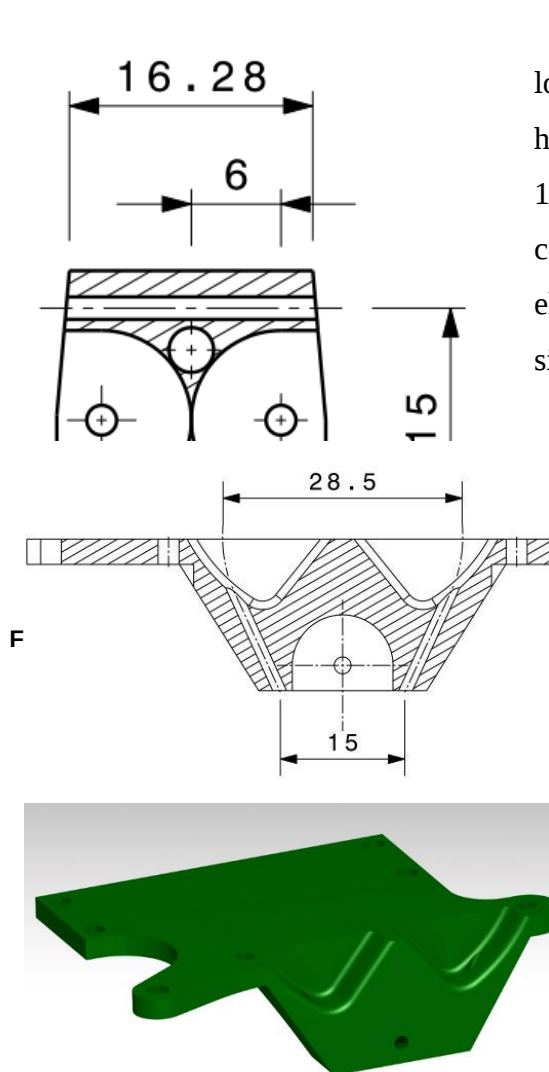


Figura 102. (Arriba) sección del eslabón, se aprecia los conductos que en los que se alojan los tensores, modificando la longitud que se indica se modificará el par y recorrido que ejercerá el servomotor. (Abajo) Geometría del eslabón 0 o bancada.

La dimensión que cubre el eslabón es la longitud del propio eslabón más la mitad del huelgo que quedan entre eslabones. Es decir, 16.28mm más 2 mm. Esta dimensión es constante para todos los eslabones, excepto para el último que tiene una dimensión mayor, siendo de 66 mm más 2 mm.

Concretamente en el eslabón hembra se aprecia que la parte realmente importante que nos ejerce el momento, es la distancia existente entre el centro de rotación de este y la longitud hasta el hilo, es decir, para nuestro diseño esta dimensión es de 7.5 mm, Figura 101. En principio esta es la dimensión que tomemos como base, pero que posteriormente se puede modificar en el brazo del servo, como se muestra en Figura 102. Es decir, se modificará fácilmente, sin necesidad de cambiar el deflector, cambiado la distancia desde el punto en el que sujetemos el cable al brazo del servo hasta el eje de rotación del servo.

Se sustituye sobre la Figura 101, las fuerzas que se ejercen sobre el eslabón, quedando la Figura 103.

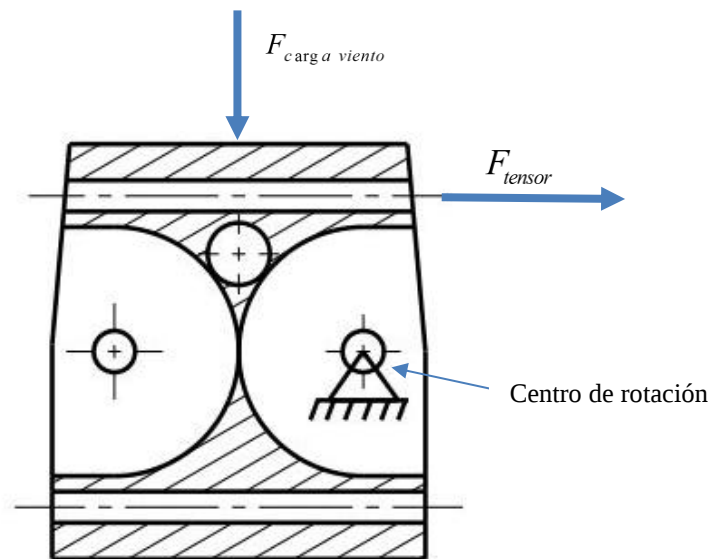


Figura 103. Para todos los eslabones se cumple este diagrama de fuerzas, ya que la presión siempre es perpendicular a la superficie.

Se realiza una hoja de cálculo, Tabla 2, en la que se calcula la fuerza que ejerce el aire sobre cada eslabón, considerando toda la superficie que soporta cada eslabón de forma independiente (teniendo en cuenta que se tienen 200mm perpendicular al papel).

Nº eslabón	Longitud que cubre [mm]	Superficie que cubre [mm²]	Presión (Fluent) [Pa] (superficie superior en deflector)	Depresión (Fluent) [Pa] (superficie inferior en deflector)	Diferencia de presiones	Fuerza resultante de carga de viento [N]	Tensión del hilo [N]
1	16,28	3256	124,8	-6,13	130,93	0,43	0,34
2	18,28	3656	121,64	-6,13	127,77	0,47	0,37
3	18,28	3656	118,52	-6,13	124,65	0,46	0,36
4	18,28	3656	115,41	-6,13	121,54	0,44	0,36
5	18,28	3656	112,29	-6,13	118,42	0,43	0,35
6	18,28	3656	109,17	-6,13	115,3	0,42	0,34
7	18,28	3656	68,66	-6,13	74,79	0,27	0,22
8	68	13600	43,73	-6,13	49,86	0,68	0,54
Suma total:							2,88

Tabla 2. Parámetros calculados para estimar la tensión del tensor próximo a la superficie deflectora.

Una vez que se tienen las fuerzas en cada eslabón se puede hacer equilibrio en cada uno de ellos, es decir, se realizan momentos de forma independiente, calculando la tensión que le ejerce al hilo, teniendo en cuenta Figura 103 y resultados en Tabla 2. De esta forma

sumando todas las tensiones que genera cada eslabón se tendrá una tensión total que será la que debe ejercer el servomotor.

La tensión del hilo se calcula, Tabla 2, teniendo en cuenta el diagrama de fuerzas anterior. Es decir, al ser las distancias conocidas, el centro de rotación, y la carga de viento se puede estimar la fuerza que debe ejercer el tensor en cada eslabón del sistema.

$$\sum M_o = 0$$

$$F_{\text{tensor}} = \frac{6 \cdot F_{\text{carga viento}}}{7.5}$$

Con ello queda justificado los resultados obtenidos en Tabla 2.

Considerando el resultado anterior se requiere de un servomotor que nos aporte 2.88 N a una distancia de 7.5 mm respecto a su centro de rotación. O lo que es lo mismo un par de 21.6 Nmm o 0,216 kg-cm.

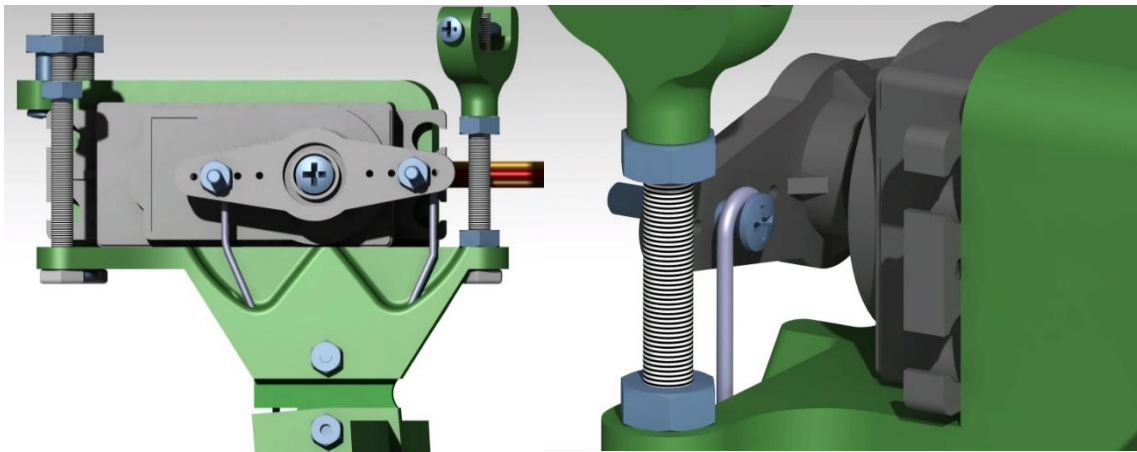
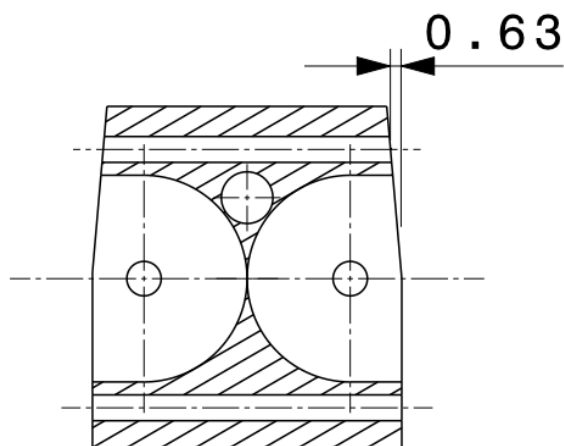


Figura 104. Disposición del servomotor

Por otro lado, se debe de verificar la extensión del cable para dimensionar el servo, es decir además del par que se necesita, también se necesita saber el recorrido que debe de hacer este. Esta distancia será igual a la necesaria para pasar de estar el deflector en posición de reposo (o completamente plano), a una posición comprimida. Se procede a medir dicha dimensión.

Según el diseño debemos tener un recorrido de $15 \cdot 0.63 \text{ mm} = 9.45 \text{ mm}$ en el hilo que tensa el servo. Teóricamente



el sistema funcionará correctamente con un solo hilo, ya que siempre trabaja a tracción, pero este segundo hilo no se omite por los siguientes motivos:

- Se pretende que ambos hilos trabajen en todas las posiciones del deflector, esto es, es decir, en todas las posiciones del deflector se consigue que los hilos trabajen, de forma que mantenga estable el deflector y elimine la posibilidad de holguras en los elementos mecánicos. De esta forma se evitarán las vibraciones y movimiento indeseados que se puedan originar.
- Además, se tiene la ventaja que tenemos más de dos posiciones para el deflector, teniendo infinitas posiciones intermedias. Mientras que, si solo disponemos de un tensor, solo podremos trabajar en los extremos, ya que de la otra forma vibrará y no funcionará correctamente.

Como suponemos que el sistema no es perfecto la dimensión de 9,45 mm será mayor, es decir, como consecuencia de holguras y la necesidad de evitar vibraciones esta dimensión se considera como 10mm. De otra forma no sería problemático el considerar 10 mm como el recorrido necesario, ya que el hilo interior sufriría una pequeña elongación.

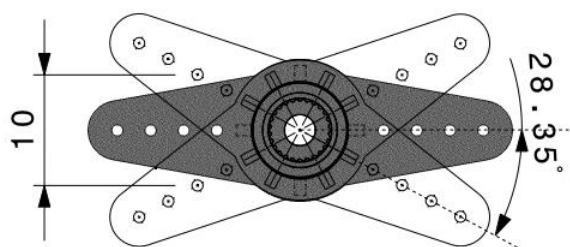


Figura 105. Recorrido brazo del servo en el accionamiento del deflector

De esta forma el hilo o tensor se debe de situar en la segunda posición del horn estándar de tamaño medio, es decir, a 10,53 mm del centro de rotación del servo.

**Nota: el material del hilo tensor debe de ser acero, ya que durante las primeras pruebas del prototipo se utilizó Nylon, teniendo demasiada elongación como consecuencia de someterlo a tracción, no rigidizando suficiente el deflector.*

15.3.2. Posiciones del deflector

Para la programación del movimiento del servomotor es necesario conocer las distintas posiciones del deflector, y por lo tanto las distintas posiciones del servomotor que lo acciona.

El servomotor se implementa de forma que debe recorrer los siguientes ángulos en las siguientes posiciones, Figura 105:

- En la posición en la que el deflector está completamente vertical el servomotor se deberá encontrar $28,35^\circ$ girado respecto de la horizontal.
- En una posición horizontal de brazo del servo el deflector se encontrará en una posición intermedia.
- En una posición del deflector completamente comprimido se deberá encontrar el servomotor girado $28,35^\circ$ en la dirección contraria al primer movimiento descrito en este punto.

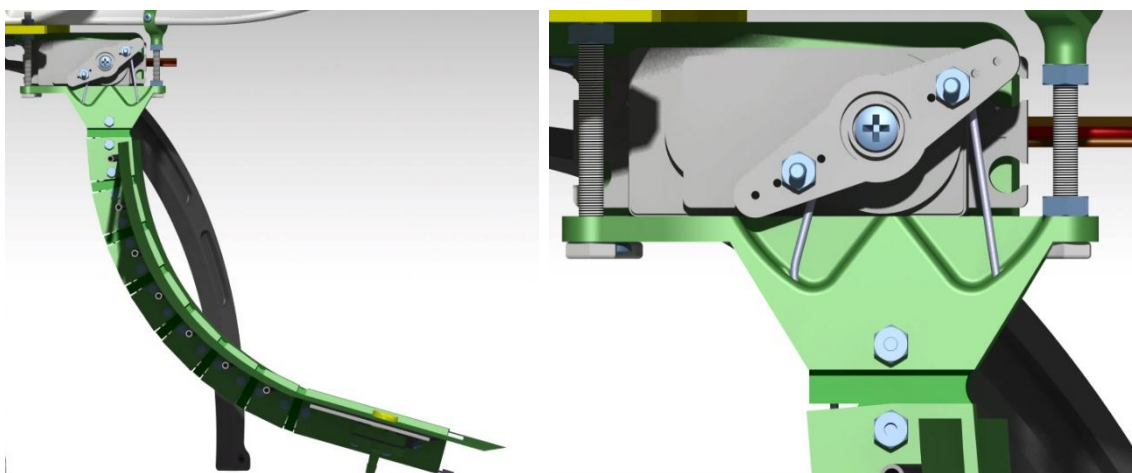


Figura 1. Posición completamente deflectado, se consigue un ángulo de flexión de $74,5^\circ$ respecto de la vertical, siendo 0° la posición en la que no se deflecta el aire (izquierda). Posición del servomotor en dicho estado (derecha).

**Nota: el diseño se deja preparado para evitar colisiones e interferencias entre elementos para otro deflector en el que se consiga un ángulo final de deflexión distinto.*

Es decir, al tratarse de un prototipo se pueden estudiar distintos casos de deflexión y distintas configuraciones para el deflector, pudiéndose implementar distintos ángulos de rotación en distintos eslabones de la cadena (fase de diseño).

16. SUMINISTRO FITOSANITARIO

El objetivo del vehículo es pulverizar fluido fitosanitario a determinadas plantaciones, por lo que es obvio que se le debe suministrar dicho fluido.

En las siguientes líneas se describen las dos alternativas propuestas para ello, siendo el objetivo final, que el sistema completo disponga de ambos sistemas intercambiables de forma sencilla, pudiendo utilizar uno u otro, dependiendo del tipo de cultivo y/o objetivo.

16.1. Desde el propio vehículo

La primera opción es el suministro de fitosanitario desde el propio vehículo, es decir, incorporando un depósito con una ‘bomba de pequeñas dimensiones’, con ello nos referimos a bombas como la que se muestra en la Figura 106. El principal inconveniente será la masa a levantar, incrementando el consumo de energía, reduciendo el tiempo de vuelo y por tanto se limitará solo a aquellas aplicaciones

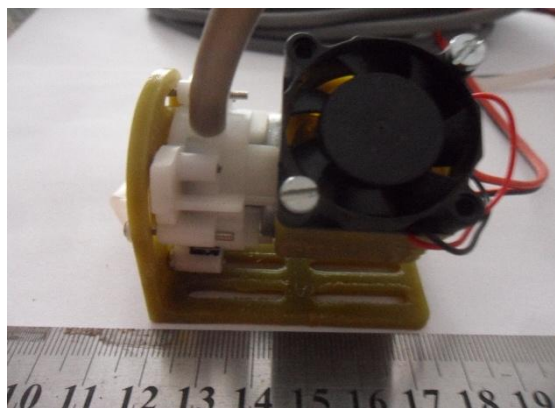


Figura 106. Bomba de engranajes de acuario, con soporte fabricado en FDM y acoplamiento de ventilador 20x20 mm. Funcionamiento 12V.

donde se requiera aplicar de forma concreta, precisa y en un tiempo reducido. Así, por tanto, si instalamos el depósito en el vehículo se tendrán las siguientes consideraciones;

- Mayor maniobrabilidad, eliminación de los problemas que puedan surgir como consecuencia de interferencias entre elementos, ya sea con el suelo o con otros elementos. Por lo tanto, será la opción más segura.
- Reducción de la autonomía de vuelo y autonomía de producto fitosanitario.

- Producto fitosanitario debe ser muy concentrado.
- Fumigación en zonas con alta dificultad en cuanto a accesibilidad.

En nuestro caso se plantea la utilización del vehículo con depósito para las aplicaciones en alta altura, ya que es peligroso alcanzar gran altura con elementos en



contacto con la tierra. Es por ello que se propone el límite de altura para la utilización del vehículo terrestre de 10 m. Con esto se cubriría prácticamente la casi la totalidad de las aplicaciones, ya que para mayores alturas se aplicará el fitosanitario de forma puntual, mientras que a menores alturas puede darse el caso en el que se deba aplicar en cultivo extensivo.

Figura 107. Hércules 30. Agriculture Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Sprayers by Homeland Surveillance & Electronics LLC. Dispone de depósito de fitosanitario en su parte inferior (Vehicles)

Esta opción no se desarrolla en profundidad ya que es la que utilizan todas las experiencias realizadas (Vehicles), (Sprayer.), (Future) y patentes en sección 22.5 Patentes relacionadas, página 194.

16.2. Vehículo propuesto autónomo

16.2.1. Descripción

Consistirá en suministrarle el producto fitosanitario, además de la energía para realizar la carga de la batería mientras se realiza la operación. Para ello, se requiere de un conductor de electricidad y fluido flexible, a la vez de ligeros, por ello la opción que mejor se adecua a nuestras necesidades son aquellos fabricados con envoltura de silicona.

Se sabe el riesgo e inconvenientes que se tienen a conectar físicamente un vehículo aéreo con uno terrestre. Para ello se describirán los sistemas que harán mitigar esto, manteniendo las ventajas principales, que son motivo por el cual se propone este sistema.

A continuación, se muestra los requerimientos para el vehículo de tierra completo propuesto:

- Bajo c.d.g.
- Permitir giro sobre sí mismo.
- Adaptación a terrenos complicados.
- Masa máxima de 100 kg.

El vehículo de tierra autónomo contendrá los elementos necesarios para su control, y el suministro de energía para un número mayor de horas de trabajo. En concreto los elementos que dispondrá serán los que se enumeran:

- Depósito de fitosanitario (12 litros)
- Ruedas que permitan el giro de 360° sobre sí mismas, con capacidad de tracción, para ello se dispondrán de un motor por cada rueda.
- Generador de electricidad compacto
- Convertidor de 220 V a 12 V
- Suministro controlado del conducto que comunica ambos vehículos
- Electrónica para su control
 - PLC
 - GPS, para determinar el posicionamiento del vehículo
 - Servomotores para controlar la orientación de las ruedas

Posteriormente se describirán los elementos anteriores y su justificación.

En nuestro prototipo se propone un diámetro exterior de 5 mm para el conductor de fluido fitosanitario, por ser una dimensión estándar, además de un tamaño adecuado para nuestra finalidad.

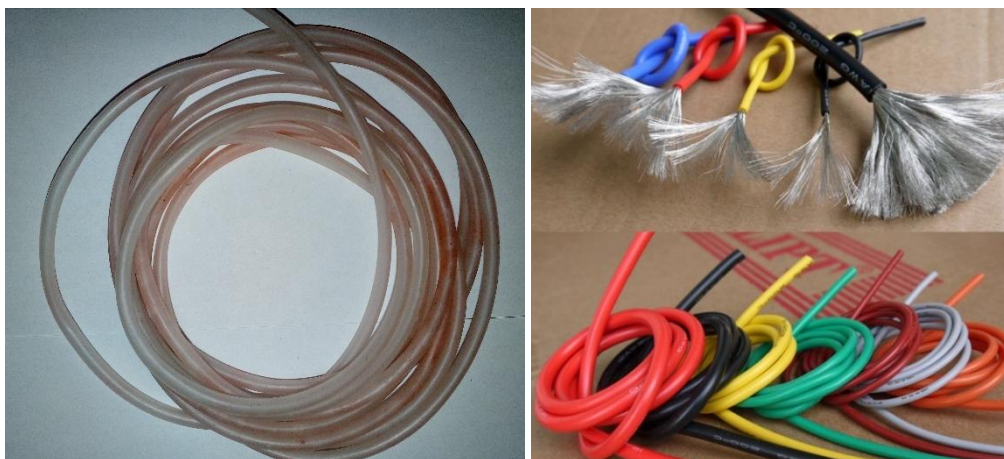


Figura 108. Manguera de fluido fitosanitario de silicona, utilizada en acuarios, (izquierda). Cables con aislante de silicona, se muestra el gran número de filamentos, empaquetados en un elastómero, logrando una alta flexibilidad al permitir el deslizamiento entre dichos filamentos (derecha)

El cable de suministro de energía eléctrica también tendrá un recubrimiento de silicona, en lugar de los recubrimientos convencionalmente utilizados para ello (PVC o PE). Estos cables tienen la particularidad de ser mucho más flexibles, ya que están pensados para este tipo de aplicaciones. Su flexibilidad se basa en tener un número mucho mayor de filamentos, por lo que, los filamentos individualmente tienen un menor diámetro, todos ellos en una envoltura de material tipo elastómero. Ello le permite el desplazamiento entre filamentos, lo que le proporciona una flexibilidad mucho mayor.

16.2.2. Ventajas e inconvenientes

Por tanto, este sistema tendrá las ventajas e inconvenientes que se muestran:

- Total autonomía. Para ello se necesita un vehículo terrestre autónomo, sincronizado con el vehículo aéreo. Es decir, este sistema será viable si ambos vehículos disponen de GPS y están sincronizados entre ellos. Con esto se evitaría interferencias entre el conjunto tubo de fitosanitario-cable con la masa foliar.
- Mayor dificultad de programación.

- Se requiere de un completo conocimiento de la plantación y estructuras que puedan influir en el procedimiento.
- Se recomienda extraer información en cuanto a geometrías de la plantación de forma periódica, por ejemplo, cada 5 años. Es decir, tener un seguimiento de la estructura de la plantación. Esta labor es común al resto de labores que se realizan en la agricultura de precisión, por lo tanto, información como ortofotos, análisis de sensibilidad de plagas, etc son aprovechables (Andalucía., 2016).
- Se limitará la altura de vuelo a 10 m, ya que se considera que para alturas mayores se adecua mejor a opción anterior.

16.2.3. Vehículo simplificado para pruebas experimentales futuras

Para las pruebas futuras que se realizarán en el presente TFG, no se dispondrá de vehículo autónomo y se suministrará el fluido desde una estación de tierra móvil manualmente. No se tendrá generación de energía en la estación de tierra, alimentándose el vehículo aéreo con su propia batería, y la bomba (estación de tierra) con otra batería.

Aun así, se realizará el diseño del sistema propuesto, aunque no se fabrique en esta ocasión, es decir, para el ensayo futuro del prototipo se diseñará un dispositivo de tierra que implemente:

- Bomba para la aplicación del fitosanitario
- Regulador de velocidad para regular el caudal suministrado por la bomba
- Batería, para la alimentación de la bomba. El objetivo de esta es meramente para las pruebas experimentales, ya que el objetivo es eliminar esta batería e implementar un generador eléctrico movido por un motor de combustión que permita mover la bomba y cargar la batería del vehículo.
- Depósito de fitosanitario. Para las pruebas se implementará un depósito con una capacidad de 5 L.
- Ruedas que permitan el giro de 360° sobre sí mismas, sin tracción ninguna.
- Sistema automático de suministro de la manguera de fitosanitario. Para evitar que se pueda interferir con otros elementos y existir problemas. (se desarrollará posteriormente)

No siendo el sistema descrito en el párrafo anterior el prototipo completo propuesto, siendo una simplificación más económica y viable en los plazos que se disponen para realizar el TFG.

16.2.4. Justificación

Como sección de cable necesaria para el suministro de energía del vehículo aéreo, se justifica en las siguientes líneas.

La sección en instalaciones de corriente continua (Bueno, 2015) y monofásica viene determinada por $S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot \cos \varphi}{\Delta V}$, donde $\cos \varphi = 1$.

S es la sección del conductor, ρ la resistividad, I intensidad y ΔV la caída máxima de voltaje admitida. En este caso, no se aplican los porcentajes de caídas de pérdidas de caída de tensión recomendados por el REBT (del 3% y 5%). En este caso se selecciona teniendo en cuenta el resto de variables, ya en este caso es más importante la masa del conductor que la caída de tensión de este. Es decir, es más interesante generar un voltaje mayor en el vehículo de tierra, disminuyendo la sección del cable. Por lo que se considerarán caídas de tensión mayores a las recomendadas el REBT, siendo una instalación ‘ineficiente’ en cuanto a pérdidas de potencia. El dimensionamiento se realiza con la corriente nominal que requiere el vehículo, teniendo en cuenta lo siguiente:

- La instalación eléctrica está sometida a una alta refrigeración
- Vuelo a baja velocidad
- Los posibles picos de corriente existentes vendrán dados cuando exista altas velocidades de viento, no consumiendo todos los motores a la misma vez la máxima potencia. Es decir, en el caso de que se llegue a máxima potencia en los motores será consecuencia de las rachas de viento, en cuyo caso serán uno o dos motores los que apliquen más potencia para estabilizar, mermando o siendo constante la potencia en los motores restantes.
- En el caso en el cual el vehículo se alimenta desde tierra, no estará cargado con depósito, por lo que en condiciones normales de vuelo (depende de del peso final del conjunto) el vehículo realiza el vuelo a un 54%, de su potencia. (12.5.4.1.2 Curvas características de la hélice, página 65)

Por lo tanto, para el cálculo de la sección se considera cobre, con una resistividad de $\rho_{Cu} = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega m$ (cobre puro), una longitud de cable de 11 m, y una intensidad

máxima del 54% de la máxima de nuestros motores, es decir, $15.9A \cdot 0.54 = 8.59 A$, al tener 4 motores, $34.34 A$. Y una caída de tensión máxima de $2 V$ se tendrá una sección de $S = \frac{2 \cdot 1.71 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot 11 m \cdot 34.34 A}{2 V} = 6.46 \cdot 10^{-6} m^2 \approx 6.46 mm^2$. Con lo que será suficiente con un conductor AWG 9 de $6.63 mm^2$ o $2.91 mm$ de sección (ToolBox).

La resistividad considerada es la del cobre puro, y por tanto la menor disponible. A la hora de comprar el conductor se deben verificar los datos del fabricante, ya que como muestra la siguiente gráfica, es muy importante la influencia de los aleantes en el conductor.

Considerando los dos conductores anteriores, se tendrá una masa de este de

$$masa_{m\acute{a}xima} = 2 \cdot \gamma_{Cu} \cdot S \cdot L = 2 \cdot 8960 \frac{kg}{m^3} \cdot 6.63 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 11 m = 1.3 kg$$

Si, repetimos el cálculo para un conductor de aluminio, se tendrá $\rho_{Al} = 2.86 \cdot 10^{-8} \Omega m$ por lo que la sección deberá de ser de $S = 1.08 \cdot 10^{-5} m^2 = 10.8 mm^2$, pudiendo ser suficiente un conductor AWG 7 con área $10.55 mm^2$ (ligeramente menor, pero válido teniendo en cuenta que tiene buena refrigeración si esta se compara con las instalaciones de baja tensión realizadas). Teniendo una masa ($\gamma_{Al} = 2698.4 \frac{kg}{m^3}$) de $0.64 kg$. Por lo que a la vista del resultado y la aplicación se debe usar una sección de aluminio, presentando el principal inconveniente en la disponibilidad de cable flexible de aluminio. Ya que usualmente dicho cable es suministrado con filamentos de 0.12 a $5 mm$.

Pero si se realiza una búsqueda en profundidad se puede encontrar cable de aluminio desde $0.050 mm$ ($S = 1.963 \cdot 10^{-3} mm^2$) (Materials), con una pureza de 99.5% , o la misma sección con una pureza de 99.999% . En este caso, su principal inconveniente sería el alto precio.

Las masas anteriores serían las más desfavorables, usualmente no será necesario alcanzar dicha altura, ya que sería más conveniente la opción del depósito y batería en el propio vehículo.

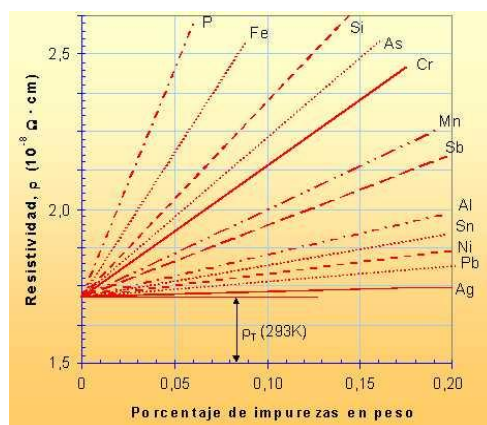


Figura 109. Influencia de las impurezas en la resistividad en el cobre. (Fuente: UPV)

16.2.4.1. Depósito de fitosanitario



Imagen 1. Depósito propuesto.

página 188 siendo la el caudal de la boquilla de pulverización de 0.27 l/min, por lo que para seis horas (autonomía del generador) se necesitaría un depósito con una capacidad de 97.2 l.

Para el prototipo se elige un depósito de 12 litros, por lo que se tendrá fluido fitosanitario para 22 minutos.

16.2.4.2. Generador de electricidad

El generador propuesto, se ha dimensionado teniendo en cuenta el consumo del vehículo. Consumiendo este un máximo de 15.9 A por motor, por lo que, la potencia máxima a consumir por el vehículo es de 718.68 W (12.5.4.1.1 Curvas características del motor, página 61). Esta potencia raramente se alcanza, ya que la aplicación no requiere que los motores entreguen la máxima potencia.

Además, se del vehículo aéreo se alimentan los cuatro motes que harán mover el vehículo terrestre, la bomba de aplicación de fitosanitario y sistemas electrónicos. Como se analiza



Figura 110. Generador utilizado. Garland BOLT. 2T 42.7 cc. (Garland)

posteriormente, el consumo de los motores que mueven el vehículo es de 7 A como máximo, por lo que con 28 A a 12 V será 336 W. Por otro lado, el consumo de la bomba utilizada a máxima carga es de 60 W (justificado más abajo).

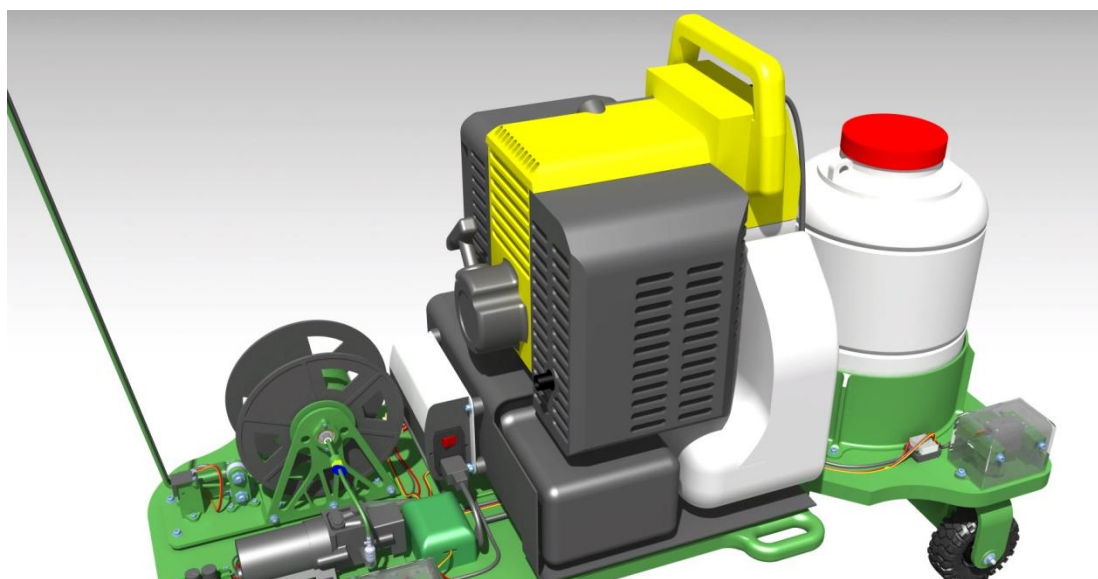


Figura 111. Generador de electricidad propuesto

La potencia consumida por los dispositivos electrónicos despreciable, comparada con los órdenes de magnitud que se tienen en el resto de dispositivos.

Por lo que si se suma la potencia necesaria se excede de los 1000W que nos debe suministrar el grupo electrógeno. Exactamente se obtienen 1114.68, de los cuales 114.68 W no se podrán suministrar si se dan todas las condiciones al mismo tiempo. Esto es, el vehículo aéreo a máxima potencia, acelerando al máximo, los motores de tierra aplicando la máxima potencia y la bomba a máxima carga.

Esta combinación de cargas eléctricas no ocurre, ya que como se ha mencionado la aplicación de fitosanitarios se realiza de forma controlada y a velocidades bajas, con por lo que la potencia del vehículo aéreo se reduce a aproximadamente el 70%. Por otro lado, tampoco se tendrá la situación en la que los motores que mueven el vehículo consuman la máxima potencia, ya que este caso sería para la carga límite que se tiene como se explica posteriormente. Es decir, este consumo es cuando se produce la rotura en la caja reductora de dichos motores. Por otro lado, la bomba de aplicación de fitosanitario no consumirá la potencia mencionada anteriormente, ya que se realiza una regulación mediante la variación de la velocidad de giro del motor, ya que el caudal es excesivamente alto (se analizará posteriormente).

Por tanto, el dimensionado del grupo electrógeno anterior se considera válido teniendo en cuenta las hipótesis anteriores.

16.2.4.3. Convertidor 220-12 V

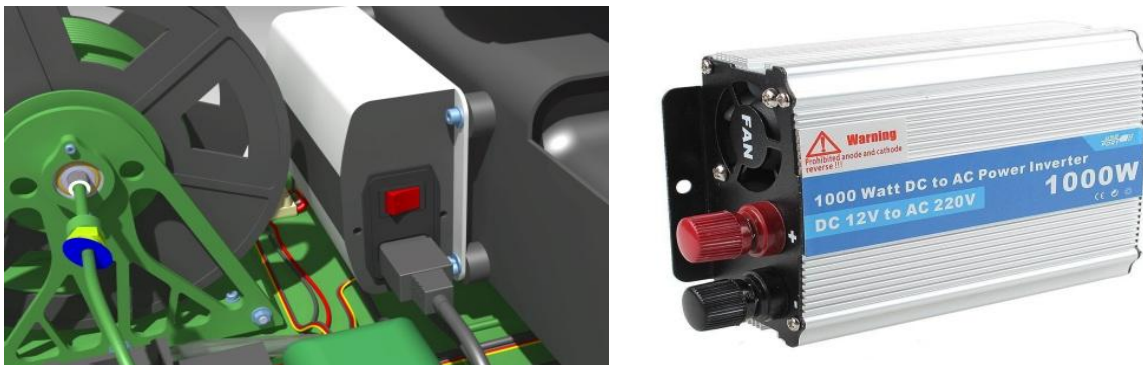


Figura 112. Convertidor de tensión propuesto, en modelo CAD (izquierda) y en modelo físico (derecha).

La característica principal es que sea capaz de convertir la potencia que suministra el generador. Es por ello que se considera un equipo de 1000W de transformándonos los 220 V en alterna a 12 V en continua. El tamaño es reducido siendo de dimensiones 158x102x54 mm.

16.2.4.4. PLC

El vehículo autónomo es controlado por el PLC, el cual lleva implementado un sensor GPS. Por lo tanto, en una primera versión se programará la ruta, al igual que se programa para el vehículo aéreo, es decir, en una primera versión se programarán las rutas de ambos vehículos. En el presente TFG no se desarrolla ningún algoritmo que sincronice ambos vehículos, siendo esto propuesto para trabajos futuros.

16.2.4.5. Servos

Se consideran servos de tamaño estándar, con un par máximo de 15 kg/cm (TowerPro).

El análisis para el dimensionamiento de dicho motor es complejo, ya que se considera que la rueda gira sobre sí misma, por lo que dependerá del coeficiente de fricción entre la superficie y la goma, que es desconocido. Además, dependerá de la geometría de la superficie, ya que usualmente es terreno no uniforme.

16.2.4.6. Bomba

La bomba que se ha implementado en el diseño esta destinada para el uso en autocaravanas, pero se adecua a nuestra necesidad por lo justificado posteriormente. El fabricante (Pump) proporciona un máximo de 100 PSI, igual a 6.89 bar. La presión de la bomba viene determinada por la presión que se requiere en la boquilla para una correcta pulverización y pérdidas de carga en la instalación.

La bomba a dimensionar es pequeña, caudal de $0.27 \frac{l}{min} = 0.0162 \frac{m^3}{h} = 0.00027 \frac{m^3}{s}$, por lo que encontrar información acerca de las curvas de estas es casi imposible, ya que la mayoría de los casos el fabricante no suministra información al no ser dispositivos industriales, por ello se estimarán algunos parámetros.

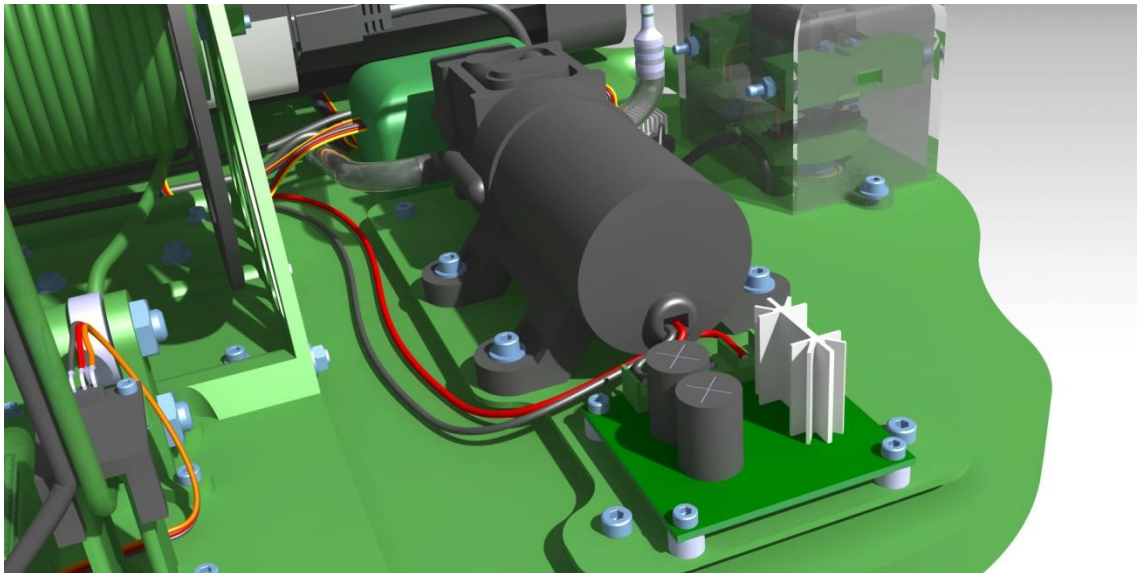


Figura 113. Bomba utilizada con el regulador de velocidad.

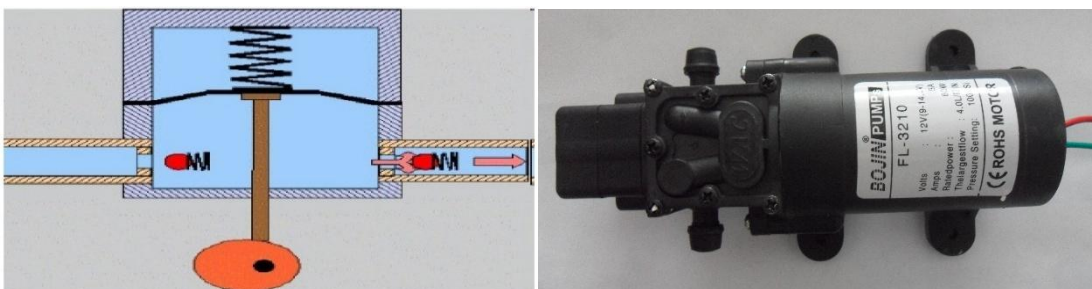


Figura 114. Funcionamiento bomba de membrana y bomba utilizada.

Se ha optado por una bomba de desplazamiento positivo ya que con un volumen reducido es capaz de generar una presión alta, además de la principal ventaja que presenta

para esta aplicación, que es el suministro de una presión constante casi independiente del caudal. Es decir, en esta aplicación el vehículo se encuentra en movimiento, pudiendo ascender y descender, por lo que constantemente varía la presión y con una bomba centrífuga variará de forma significativa el caudal. Pudiendo influir en la calidad del pulverizado, esto se observa en las curvas característica de esta, Figura 116.

16.2.4.6.1. Pérdidas de carga en instalación. Curva del sistema

Si analizamos las pérdidas de carga en la instalación tenemos los siguientes parámetros:

- Altura 10 m
- Tubo de PVC de 4mm interior.
- Caudal de $0.27 \frac{l}{min} = 0.0162 \frac{m^3}{h} = 0.00027 \frac{m^3}{s}$, que es lo que pulveriza la boquilla, Figura 177, a una presión de 5 bares para la boquilla elegida, este dato es dado por el fabricante de boquillas.

Se aplica la ecuación de la energía, $H_0 + H_{bomba} = H_1 + H_r$; $H_{bomba} = \underbrace{H_1 - H_0}_{\Delta H} + H_r$

El incremento de altura es de 10m, ya que con esta altura se cubren la mayoría de las aplicaciones. Las pérdidas de carga H_r se estimarán con la ecuación de Darcy-

Weissbach expresada en forma de caudal $H_r = \frac{8}{\pi^2 \cdot g} \cdot f \frac{L \cdot Q^2}{D^5}$ donde el factor de fricción

se estimará con Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right). \text{ Como se sabe hay que iterar.}$$

La rugosidad relativa del PVC es de 0.0015 mm, por lo que el cociente k/D será de 0.375. El número de Reynolds en dicho conducto, teniendo en cuenta que

$$Q = v \cdot S = v \cdot \pi \frac{D^2}{4} \rightarrow v = \frac{4 \cdot Q}{D^2 \cdot \pi},$$

$$\text{se podrá expresar en función del caudal } Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \rightarrow Re = \frac{4 \cdot \rho \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \mu},$$

por lo que, al sustituir, $\mu_{25^{\circ}\text{C}} = 0.89 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ y el resto de valores se obtiene un Reynolds de 96565,92.

Con todo ello suponemos un factor de fricción de 0.015 para comenzar a iterar. Tras varias iteraciones converge en 0.7092 para el factor de fricción. Por lo que se sustituyen todos los valores en la ecuación de Darcy:

$$H_r = \frac{8}{\pi^2 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2} \cdot 0.7092 \cdot \frac{30 \cdot Q^2}{0.004 \text{ m}^5} = 439.49 \cdot Q^2$$

Que al sustituir en la ecuación principal, se tiene la ecuación del sistema:

$$H_{\text{bomba}} = \underbrace{H_1 - H_0}_{\Delta H} + H_r = 10 + 439.49 \cdot Q^2 \rightarrow \boxed{Q = 10 + 439.49 \cdot Q^2}$$

La curva anterior es la curva en la que no se ha tenido en cuenta la presión de la boquilla. Para que funcione la boquilla se requiere 5 bares adicionales, por lo que esta presión (en metros de columna de agua) se suma a término izquierdo de la ecuación anterior, ya que la presencia de la boquilla hace aumentar las pérdidas de carga en el conducto.

Se convierte de unidades los 5 bares, que se requieren como valor mínimo para pulverizar correctamente en la boquilla $5\text{bar} \cdot \frac{100\text{kPa}}{1\text{bar}} = 500\text{kPa}$. Teniendo en cuenta que el fluido es agua, en metros de columna de agua es 50.96 m. Esta altura se suma directamente para obtener la curva del sistema $\boxed{Q = 60.96 + 439.49 \cdot Q^2}$.

16.2.4.6.2. Curva de la bomba

Por otro lado, se desconoce la curva de la bomba ya que su fabricante no nos la proporciona o la desconoce (Pump), por ello se estima mediante los datos que nos aporta, como caudal máximo y presión máxima que alcanza. Esta máxima presión es cuando se vence el muelle y acciona un final de carrera directamente conectado a alimentación de la misma, Figura 115. Al ser una bomba de diafragma si no se corta la presión puede resultar dañada si se excede esta, ya que el motor puede seguir moviendo esta. Este es uno de los principales inconvenientes que tienen las bombas de desplazamiento positivo, y es que requieren de un mecanismo que cual limite la presión.

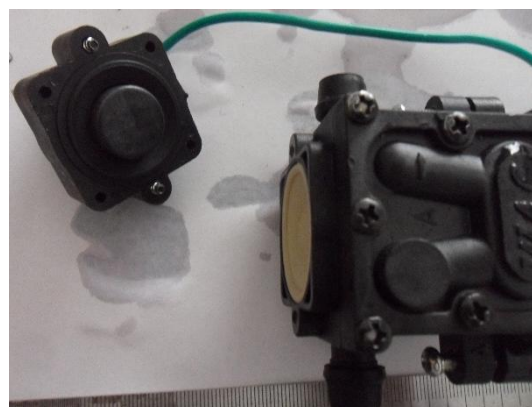


Figura 115. Membrana que acciona el final de carrera para la parada del motor.

El caudal máximo alcanzado son 4l/h y la presión máxima de 6.89 bar=689 kPa. Por lo que, se realiza la aproximación de la curva de la bomba, (se desconocen todos los puntos intermedios de la gráfica), y se tiene en cuenta que las curvas de las bombas de diafragma no son similares a las centrífugas. En las centrífugas la curva terminará en el eje de abscisas y ordenadas por la propia limitación en su forma de impulsar el fluido.

En este caso, cuando se alcanza la presión, vence el muelle y acciona el final de carrera, abriendo el circuito, por lo que la pendiente de la curva para bajos flujos máscicos será mayor en el caso de la bomba de diafragma. Para bajos caudales, será el final de carrera el que limite la altura máxima que alcance, no es como en las bombas centrífugas en las que al tener alta presión en la voluta de salida el fluido no es capaz de avanzar por el conducto y ascender. Es decir, en la parte izquierda de la bomba tenemos una línea recta a una altura de 70.23 m, para diversos caudales. Justificada la ya curva de la bomba, esta quedará como se muestra Figura 116.

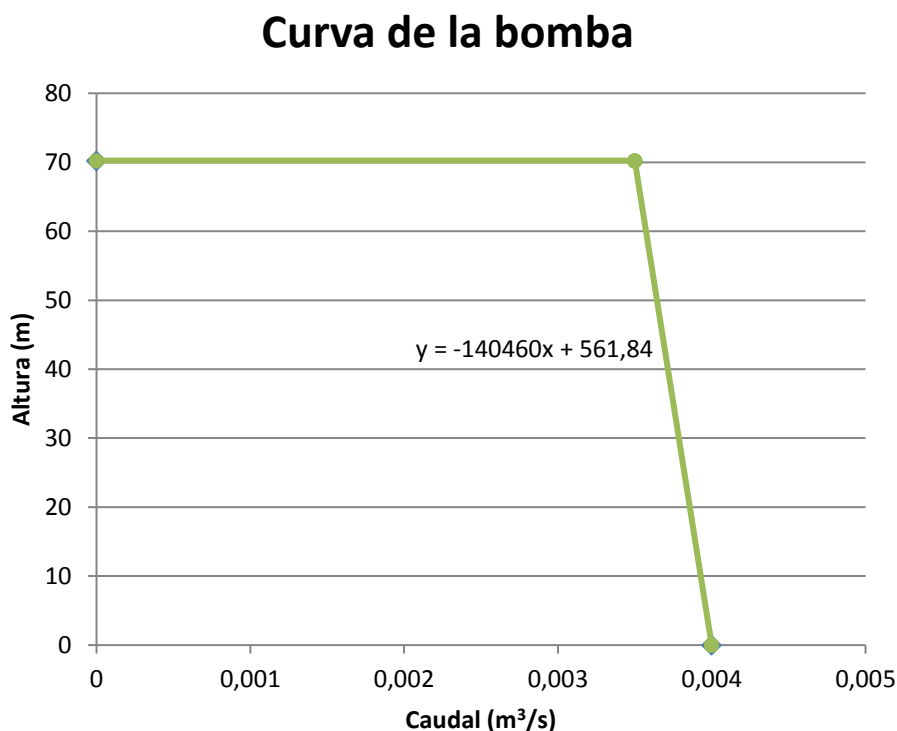


Figura 116. Curva de la bomba, en la que se muestra la ecuación del tramo derecho de dicha curva.

Donde la pendiente de la ecuación $y = -140460x + 561,84$ es grande, cuyo significado físico es la variación de velocidad en régimen de giro del motor, cuando sometemos a la bomba a una diferencia de presión. Esta variación es pequeña, y por ende la pendiente de la recta es pronunciada. Por otro lado, para caudales menores a $0,0037 \text{ m}^3/\text{s}$ y alta presión se abrirá el circuito eléctrico por el limitador de esta, independientemente del caudal en su mayor parte de trabajo, Figura 116.

La presión máxima que nos suministra la bomba es de 6,89 bar, en S.I será (1bar=100 kPa) de 689 kPa. Teniendo en cuenta la expresión de la presión estática, $p = \rho \cdot g \cdot h$ despejamos h para saber la altura de la columna de agua máxima que es capaz

$$\text{de levantar. } \frac{p}{\rho \cdot g} = h \rightarrow h = \frac{p}{\rho \cdot g} = \frac{689 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2} \rightarrow \boxed{h_{\text{max}} = 70.23 \text{ m}}$$

16.2.4.6.3. Punto de trabajo

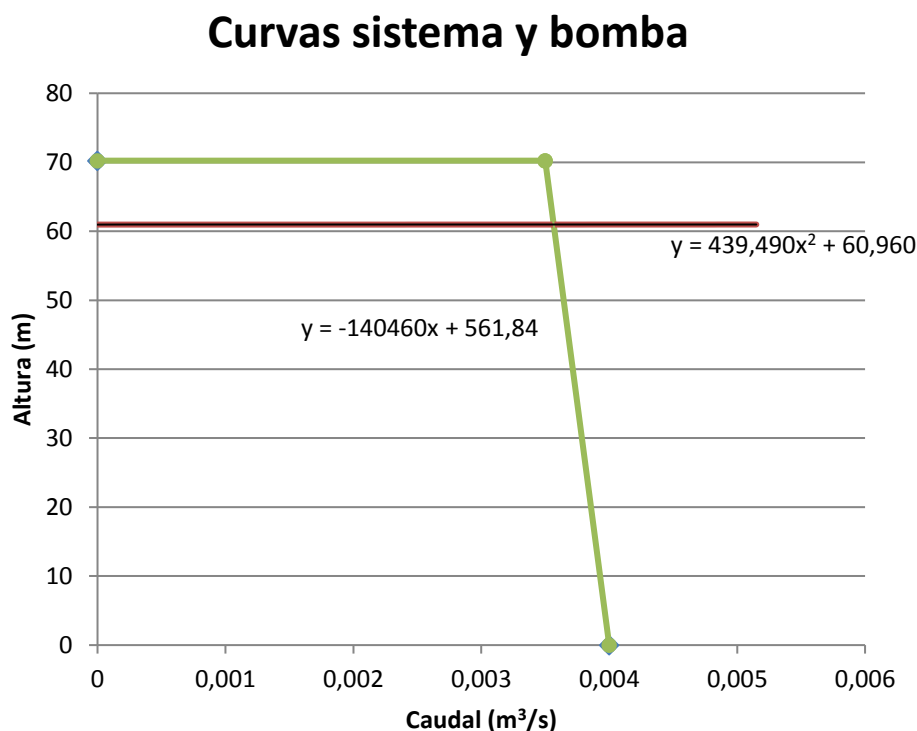


Figura 117. Curva del sistema y de la bomba. La curva del sistema se muestra casi horizontal, ya que las pérdidas de carga son reducidas.

Con el resultado de ambas curvas, se calcula la intersección y, por lo tanto, se tiene el caudal que circula por la instalación.

Desde el punto de vista de análisis estas bombas son más sencillas que las centrífugas. Ya que, como se ha mencionado el caudal es prácticamente independiente de la altura de elevación.

16.2.4.6.4. Regulación de la bomba

La regulación de la bomba se realiza con la modificación del régimen de giro del motor (Escamilla). Pudiéndose estimar fácilmente (al no disponer de ningún dato del fabricante) el caudal que circula para regímenes menores. Es decir, realmente existen fugas internas, en la propia bomba, que dependiendo del caudal en el cual trabaje (y regímenes de giro distintos), puede ser que este cambie. Con ello, si se tiene un régimen de giro alto (caudal alto) y mantenemos una presión intermedia, apenas tendrá tiempo el fluido de retroceder, por fugas internas. Si el régimen de giro es bajo, para una misma

diferencia de presión, tendrá mayor tiempo para retroceder, ya que válvulas estén en transición de apertura o cierre y pueden existir mayores pérdidas.

Aun así, lo anterior no es relevante, ya que puede inducir pequeños cambios, no cometiendo grandes errores si los despreciamos.

Por tanto, con las consideraciones anteriores, si se quiere reducir el caudal a la mitad se ha de reducir el número de revoluciones a la mitad. Con ello se realiza una sencilla regulación de la bomba, para que suministre el caudal que solicite la boquilla.

Analíticamente, tenemos la curva de la bomba, para el caudal de estudio, $H = 70.23m$ y se desea que en la intersección se tenga el caudal que se requiere la boquilla. Por lo que al desconocerse la velocidad de giro que se tiene para el caudal máximo se estimará como una velocidad porcentual.

El valor de la altura a la cual estamos situados se calcula al sustituir en la curva del sistema. Es decir, al tener la curva: $h = 439.49Q^2 + 60.96$ donde para un caudal de $0.00027 \text{ m}^3/\text{s}$ le corresponde una altura de 60.96 m. Por lo que la recta, paralela a la del extremo derecho, que pase por el punto $0.00027 \text{ m}^3/\text{s}$ y 60.96m le corresponderá una ecuación de $h = -140460 \cdot Q + n$, donde n, tomará el valor de 103.88.

Así la ecuación de la bomba, regulada, para que nos suministre dicho caudal en nuestra instalación es de $\boxed{h = -140460 \cdot Q + 108.15}$. Dicha curva, para una altura nula y un caudal máximo tendrá su origen en un caudal de $7.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, que, con respecto al caudal máximo que proporciona la bomba, $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, significa un 19.25%. Es decir, deberemos de regular la bomba para que el régimen de giro sea un 80.75% menor al máximo.

Por defecto bomba dispone de regulación mediante sistema de arranque y parada, con el mencionado final de carrera que se acciona cuando se excede de la presión consigna (100 PSI). Este tipo de regulación es muy eficiente, ya que no consume potencia si no existe demanda de caudal. No obstante, se requiere la regulación de velocidad anterior, para que no se produzca más de seis paradas a la hora, con el fin de evitar el deterioro del motor eléctrico que acciona la bomba.

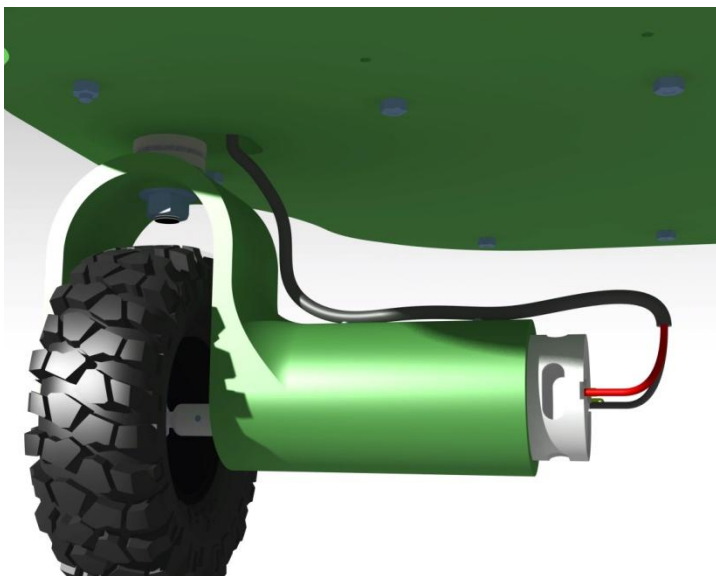
16.2.4.7. Controladores motores - motores

Figura 118. Conjunto motor-rueda.

últimas funciones no tienen sentido. Se escoge un modelo económico, resistente al agua y que pueda soportar el consumo del motor, para ello se analiza la potencia máxima que requiere en el motor y la que proporciona el controlador.

El control de los motores se realiza electrónicamente mediante el variador de velocidad. El funcionamiento es igual que los descritos para el vehículo aéreo, con la diferencia que es para un motor monofásico, además de integrar freno y marcha atrás. Que en el caso del vehículo aéreo estas dos

Si consideramos un motor genérico, de similares características se tienen los siguientes datos.

La potencia máxima que es capaz de entregar el motor es de 245 W con una corriente máxima de 85 A. Este pico de potencia está situado aproximadamente en la mitad de las revoluciones totales, es decir, a 9500 rpm. La intensidad máxima, será en el arranque, donde entrega el par máximo.

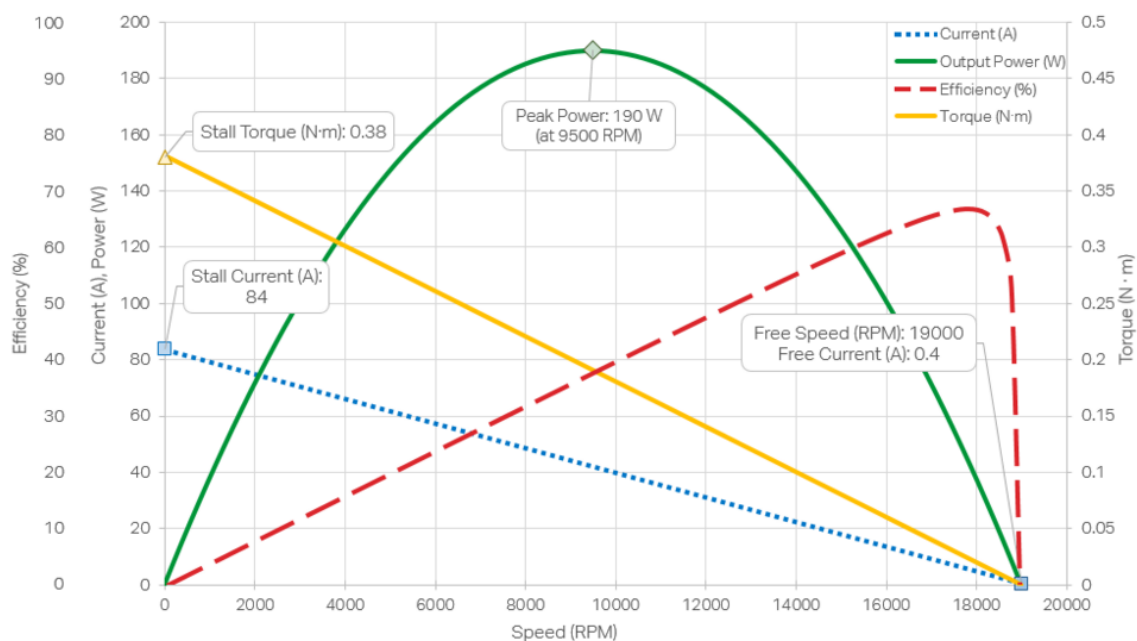


Figura 119. Curvas orientativas de los motores eléctricos de tracción similares. Se considera un motor similar al no tener información disponible de las curvas de potencia del motor implementado.

Se debe asegurar que nuestro variador de velocidad permite corrientes mayores, ya que el voltaje es el mismo en ambos elementos.

Según el fabricante (car) el variador de velocidad elegido proporciona 20 A de forma continua y 320 A de pico. Por lo que como siempre se va trabajar en un régimen de giro mayor a 2000 revoluciones no se tendrá ningún problema. Lo anterior son los datos de un motor similar, para un mismo uso, un mismo tamaño y un similar bobinado, si se analiza los datos del motor con la reductora hay discrepancias en cuanto al consumo del motor.

El fabricante del motor con caja reductora nos aporta la siguiente tabla:

Voltage	No Load		Load Torque				Stall		Reducer		weight
Rated Volt.V	Speed rpm	Current ma	Speed rpm	Torque kg.cm	Output W	Current A	Torque kg.cm	Current A	Ratio 1:00	L mm	g
6	1000	0.8	800	2.5	30	2	13	5	8	23.5	285
	434	0.8	368	5.5	30	2	29	5	19	23.5	288
	343	0.8	274	6	30	2	35	5	24	24	288
	147	0.8	124	10	30	1.5	40	5	56	27	300
	103	0.8	82	13	30	1.5	50	5	80	27	300
	62	0.8	53	20	30	1.5	60	5	131	31	320
	49	0.8	42	30	30	1	80	5	168	36	330
	27	0.8	23	40	30	1	120	5	305	36	340
	16	0.8	14	50	30	1	160	5	505	38	360
12	8	0.8	7	60	30	1	230	5	973	40	380
	2000	1.6	1600	5	60	3	26	7	1:8	23.5	285
	868	1.6	738	8	60	2.5	50	7	19	23.5	288
	688	1.6	585	9	60	2.5	55	7	24	24	288
	295	1.6	250	12	60	2	80	7	56	27	300
	206	1.6	165	18	60	2	100	7	80	27	300
	125	1.6	106	25	60	1.5	120	7	131	31	320
	100	1.6	85	40	60	1.5	150	7	168	36	340
	54	1.6	46	45	60	1.5	180	7	305	36	360
	32	1.6	27	50	60	1.5	230	7	505	38	360
	16	1.6	14	60	60	1.5	260	7	973	40	380

Figura 120. Características del conjunto empleado motor-reductora.



Figura 121. Motor con los dos milímetros, ya que por su reducido volumen del reductora utilizado.

Como se aprecia la corriente máxima es de 7 A, mientras que en la gráfica anterior Figura 119, se aprecia como el consumo podría ser mucho mayor. Esto puede es debido a que cuando se somete el motor con reductora al par máximo el factor limitante no es el motor, sino la reducción. Los engranajes están fabricados en acero, pero el espesor no supera los dos milímetros, ya que por su reducido volumen del conjunto obliga a que estos sean estrechos.

Además, la reducción que integra el motor es de 1:973 por lo que la velocidad máxima del motor es de 15568 rpm para tener a la salida de la reductor 14 rpm, con un par máximo de $260\text{kg} \cdot \text{cm} = 25.5\text{N} \cdot \text{m}$.

16.2.4.8. Ruedas



Figura 122. Ruedas de alto agarre, con diámetro exterior de 110 mm. Son utilizadas en modelismo radiocontrol en modalidad Crawling.

Se considera unas ruedas de tamaño no muy grande para no subir el c.d.g, pero que a su vez proporcionen un alto agarre.

Una vez consideradas las ruedas, y su tamaño, se puede estimar de forma sencilla la carga que es capaces de arrastrar el vehículo. Las dimensiones de la rueda considerada, en el caso de que esté completamente inflada es de 110 mm.

El par suministrado por cada uno de los motores es de $25.5N \cdot m$, siendo la fuerza de empuje capaz de arrastrar de 463.64 N, o lo que es lo mismo 47.3 kg. Si se tiene en cuenta que hay 4 motores, teóricamente se puede arrastrar 189 kg. Si es terreno abrupto puede ser que no traccionen las cuatro ruedas por igual y el peso máximo del vehículo en conjunto deba de ser menor. Para minimizar este hecho se debe de dotar al vehículo de un sistema de amortiguación o adaptación al terreno similar al que se propone.

16.2.4.9. Chasis

No tiene sentido dotarlo de amortiguadores, ya que además de complicar el sistema excesivamente no aporta ninguna ventaja. Tan solo se comportaría mejor a velocidades altas, pero al tratarse de un vehículo de carga, el cual se desplaza a baja velocidad es innecesario la implementación del conjunto muelle-amortiguador.

De esta forma, la geometría a la más semejante mecánicamente es a los tractores, los cuales, no disponen de amortiguadores, y la adaptación al terreno se realiza mediante la articulación en el eje delantero. El este eje delantero bascula sobre un eje situado en el

dentro del tractor, de forma similar a nuestro vehículo, con la diferencia de que el eje ahora es todo el chasis.

Si se desea realizar un vehículo que pueda portar una mayor carga se deberá considerar otros motores de mayores prestaciones. Pero para el objetivo del TFG y la posible fabricación futura del prototipo este tamaño de vehículo será suficiente.

Tampoco se debe olvidar que el producto debe de ir en alta concentración, reduciendo por tanto la cantidad de fluido aplicado y consecuentemente todo lo que ello lleva asociado.

El chasis del prototipo puede ser fabricado en madera, metal, o material compuesto.

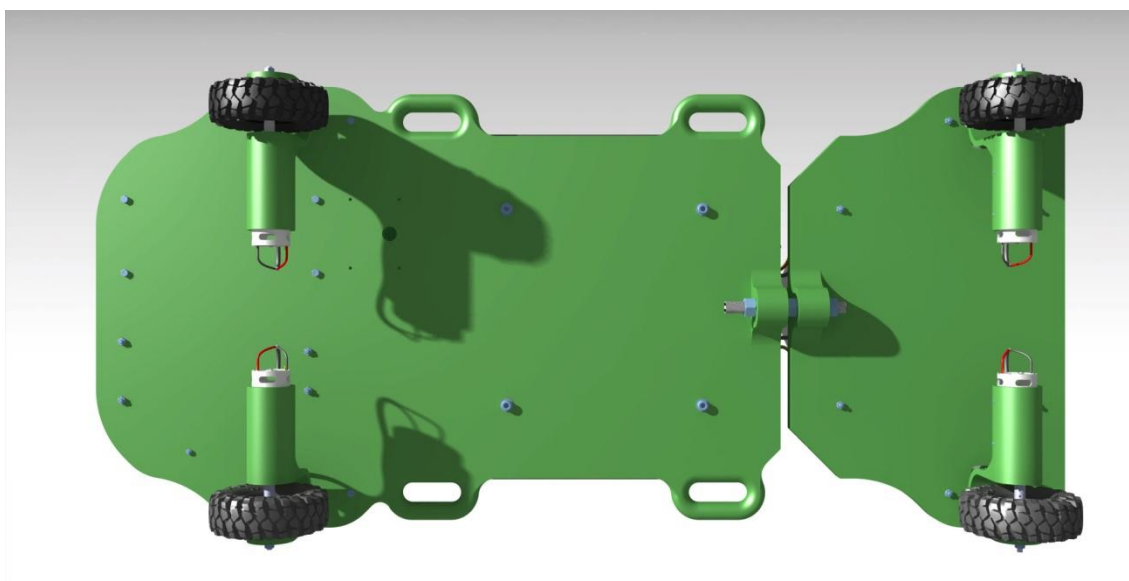


Figura 123. Vista inferior del chasis. Vista inferior del chasis.

En la articulación central se ha implementado una varilla roscada de M12, a continuación, se realiza una estimación de si este elemento puede soportar la carga que se le solicita.

Para lo anterior se realizar el diagrama de flectores que se tiene con la disposición actual.

La carga debido al depósito de fitosanitario es de 12 kg, es decir, un depósito con capacidad de 12 litros, que se modela como carga distribuida.

Como se aprecia, las reacciones calculadas para dicho supuesto de cargas, suponiendo la orientación que se muestra para el vehículo, Figura 124, son de valor 52.98 N y 148.16 N para A y B respectivamente.

Ello servirá para comprobar que los rodamientos axiales, situados en las ruedas resisten esta carga. Además, el diagrama de distribución de momentos es útil para verificar la carga que soporta el pasador.

16.2.4.9.1. Comprobación a resistencia del perno

El dimensionado y comprobación se realiza como una viga biapoyada, donde dichos apoyos son las ruedas. Las cargas y condiciones de contorno dependerán del diseño del vehículo, para ello se establecen unas masas y unas dimensiones aproximadas.

La distancia entre ejes es de 710 mm y las dimensiones más relevantes son las que se muestra en la imagen.

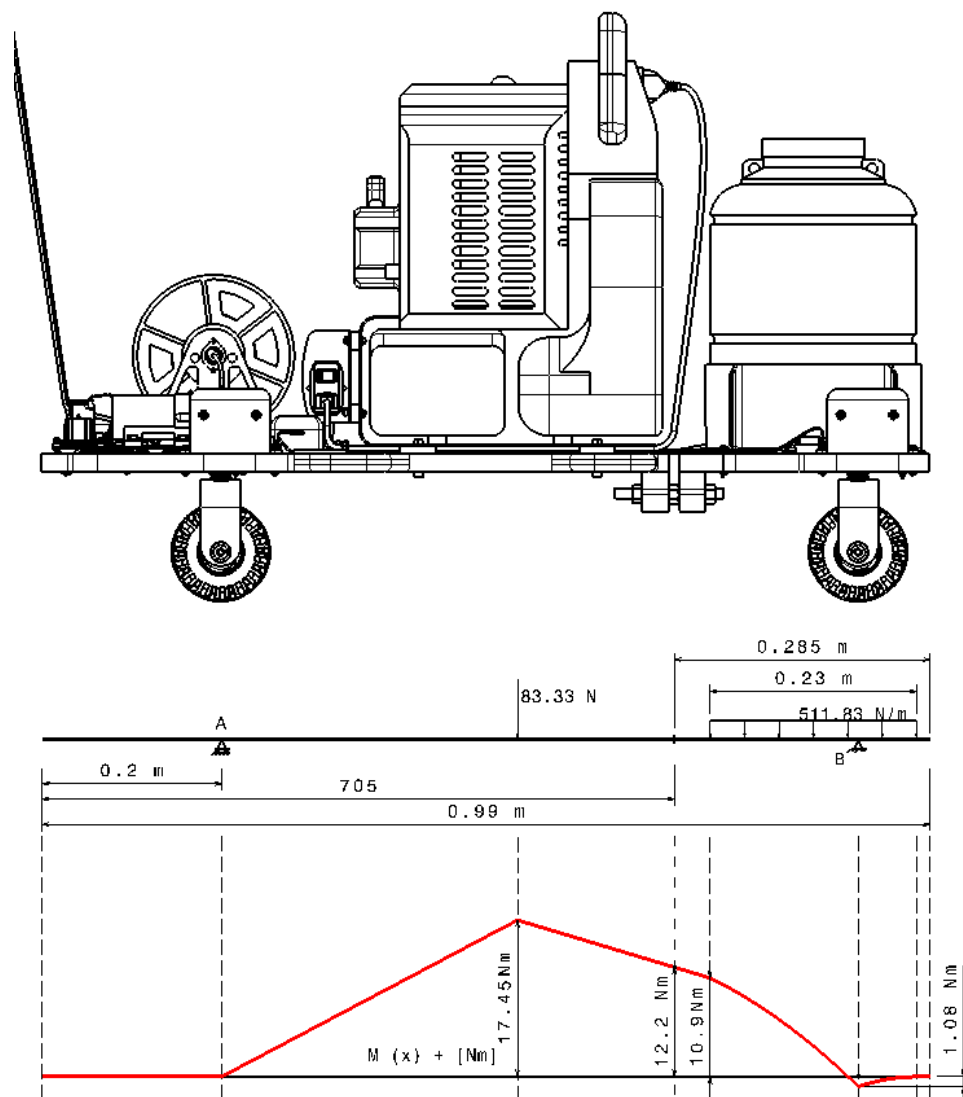


Figura 124. Diagrama de momentos flectores en el vehículo de tierra.

La distribución de momentos anterior es válida para estimar el dimensionamiento de la placa donde se aloja todo el conjunto y el pasador que une las dos partes del vehículo.

Es claro que, si se busca minimizar los momentos flectores, y consecuentemente la sección del chasis del vehículo no estarán situadas las ruedas en la disposición más eficiente. Así, por ejemplo, para el pasador que une ambas partes del vehículo se tiene un momento de 12.2 Nm, considerando que se tiene una varilla o perno de métrica 12 el diámetro efectivo de dicho pasador será de (BOSCH, 4ª Ed. 2005) 9.570 mm.

Con Navier $\sigma_{flexión} = \frac{M}{W_{ela}}$, al ser una sección circular

$$W_{ela} = \frac{I}{r} = \frac{\frac{\pi \cdot r^4}{4}}{r} = \frac{\pi \cdot r^3}{4} = \frac{\pi \cdot 4.785^3}{4} = 86.05 mm^3$$

Por lo que si se sustituye el valor del momento 12.2 Nm queda que

$$\sigma_{flexión} = \frac{12.2 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{86.05 \text{ mm}^3} = 141 \text{ MPa}$$

que debe de ser menor a 227 MPa, en el caso más desfavorable de tratase de un acero de bajo a medio carbono (Budynas, y otros, Octava Ed. 2008). Además, se verifica si le añadimos un coeficiente de seguridad de 1.6.

El esfuerzo axil se desprecia al tener las cuatro ruedas motorizadas y por tanto no suponer esfuerzo alguno. O siendo este muy pequeño en el caso de que se trate de terrenos abruptos.

16.2.4.9.2. Comprobación de esfuerzo axil en rodamientos axiales

Se deben verificar las dimensiones del rodamiento, en cuanto a diámetro interior, ya que en la parte superior de este se encuentra un rodamiento 608-Z (Bearing) con dimensiones que se muestra en la imagen

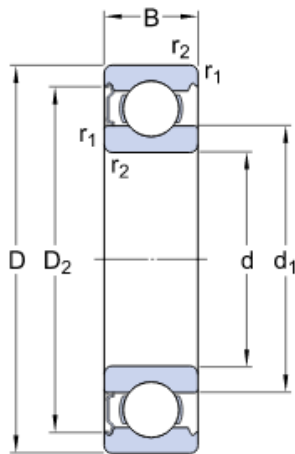


Figura 125. SKF 608-Z, rodamiento axial. (Bearing)

d	8	mm
D	22	mm
B	7	mm
d ₁	≈ 12.15	mm
D ₂	≈ 19.2	mm
r _{1,2}	min. 0.3	mm

Para el asiento y selección del rodamiento axial se tienen varias alternativas, enumeradas a continuación:

- Ajustar con la tolerancia adecuada el alojamiento del rodamiento radial (depende del método de fabricación), de esta forma el rodamiento axial asienta en la pista exterior del rodamiento radial, además de en el resto de superficie circundante a dicho rodamiento radial. Se debe tomar la precaución de que el rodamiento radial debe de tener un diámetro interior mayor a d_1 , ya que, de lo contrario, el rodamiento radial vería afectado su movimiento como consecuencia del apoyo del rodamiento radial. Esta explicación, para facilitar su comprensión se apoya en Figura 126 y Figura 127.

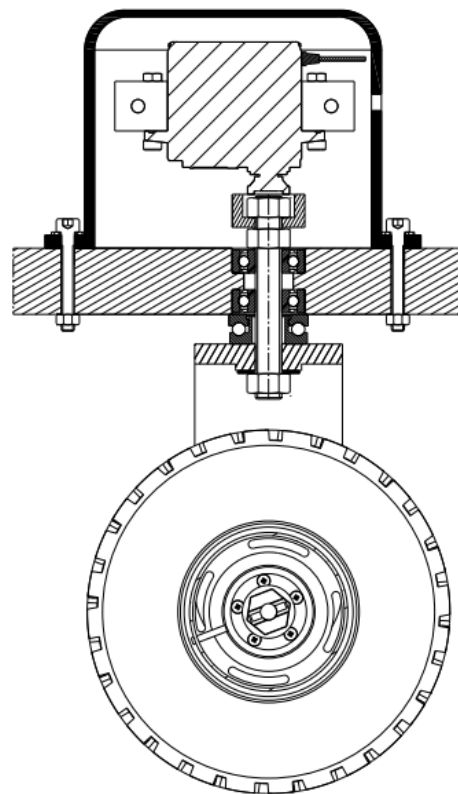


Figura 126. Sección transversal a dispositivo de giro de la rueda.

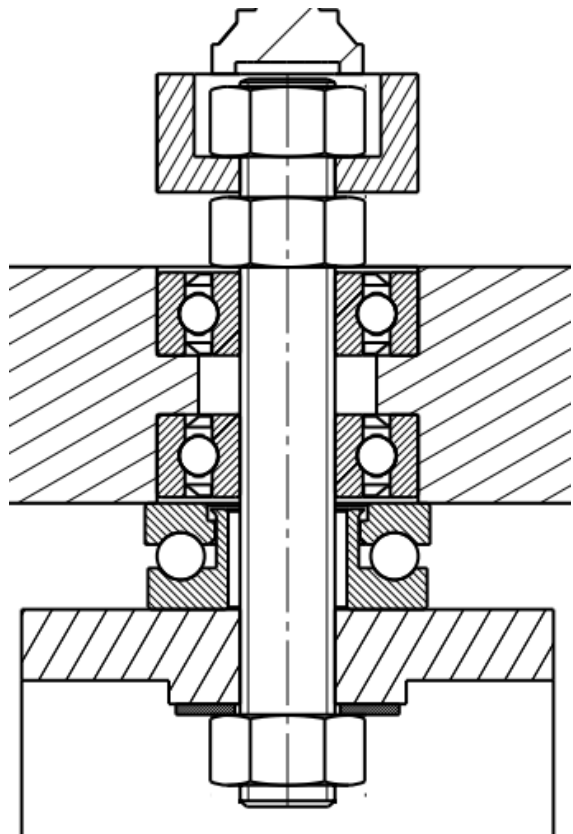
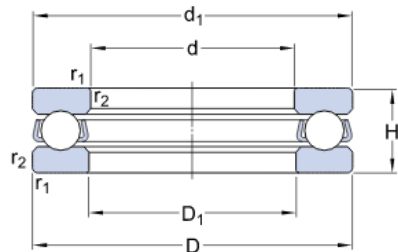


Figura 127. Sección en detalle de rodamientos. Presenta deficiencia en cuanto al asiento del rodamiento axial.

- Otra opción es hacer el alojamiento del rodamiento con un espesor mayor a 7mm, de esta forma no tendría ningún contacto el rodamiento axial con dicho rodamiento. Con el inconveniente de que el rodamiento axial asentaría solo a partir de un diámetro de 22mm, por lo tanto, debe escogerse un rodamiento axial mayor para conseguir mayor asiento.
- Otra opción consiste en utilizar un rodamiento axial con diámetro interno mayor a los 8 mm de la varilla, por ejemplo, se propone el rodamiento SKF 51102 con dimensiones que se muestran en Figura 128.

Dimensions



d	15	mm
D	28	mm
H	9	mm
d ₁	≈ 28	mm
D ₁	≈ 16	mm
r _{1,2}	min. 0.3	mm

Figura 128. Rodamiento axial de bolas SKF 51102 (Bearing).

De esta forma, con un diámetro interior de 15 mm se salva la dimensión de la pista interna del rodamiento radial 608 Z, es decir $d_1 \approx 12.5 \text{ mm}$. Para asegurar que el rodamiento esté situado en una posición correcta, concéntrica a eje, se utiliza un casquillo separador, con diámetro interior de 8 mm y exterior de 15 mm y altura menor a 9 mm, por el motivo mencionado anteriormente.

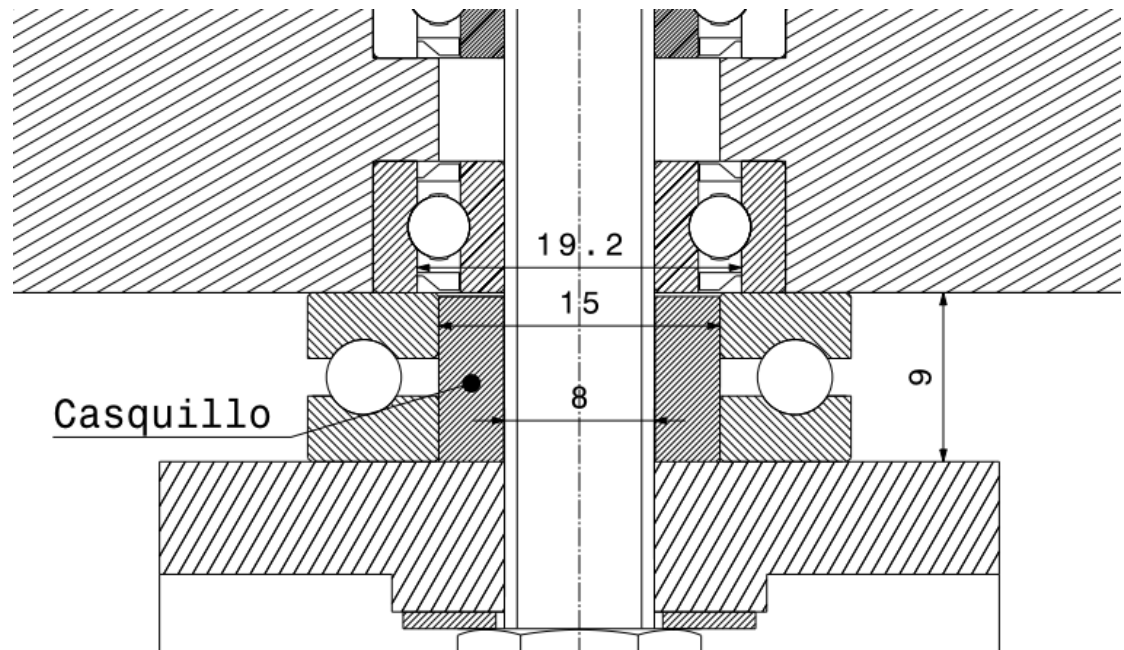
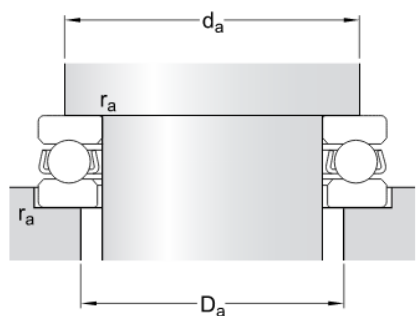


Figura 129. Sección de la configuración de rodamientos final.

Además, se comprueba que no se exceden los límites de asiento de dicho rodamiento, según el fabricante, la dimensión D_a debe de ser menor a 20 mm, como se muestra en la siguiente imagen.



d_a	min.	23	mm
D_a	max.	20	mm
r_a	max.	0.3	mm

Figura 130. Dimensiones límite a tener en cuenta en el asiento del rodamiento 51102.

Por lo tanto, una vez se tiene el rodamiento definido se comprueba que cumple con la carga requerida. Las exigencias para el rodamiento son mínimas, ya que no realiza vueltas completas, por lo que la falla a fatiga se minimiza, además, el fabricante asegura la resistencia para una carga estática de 18.3 kN, y dinámica de 10.6 kN. Por lo que se puede asegurar que se encuentra trabajando en zona de vida infinita, ya que la carga

estática y dinámica que se le solicita es del peso del conjunto total entre 4 ruedas de las que dispone (Budynas, y otros, Octava Ed. 2008).

16.2.4.9.3. Comprobación de rodamientos radiales

De forma similar se analiza el rodamiento 608 Z seleccionado. Se realiza un sencillo análisis de fuerzas para determinar la carga máxima a la que estará sometido. Dicho rodamiento solo soportará carga radial, permitiendo soportar cargas axiales de baja magnitud al ser de bolas, pero en este caso ya se dispone del rodamiento axial que soporta dicha carga.

Para el análisis de fuerzas al que están sometidos dichos rodamientos se supone que el vehículo es capaz de ascender una pendiente de 45° de inclinación. Dicha inclinación, dependerá de la masa del vehículo, además del coeficiente de rozamiento entre el neumático y la superficie. En dicha situación se analizan las fuerzas que son transmitidas a los rodamientos (Budynas, y otros, Octava Ed. 2008). También se ha supuesto que la varilla roscada no está apretada, por lo que el rodamiento axial no soportará esfuerzo alguno. De forma que se ilustra a continuación:

Se considera la Figura 131 para realiza la Figura 132, incluyendo las dimensiones necesarias para realizar el cálculo.

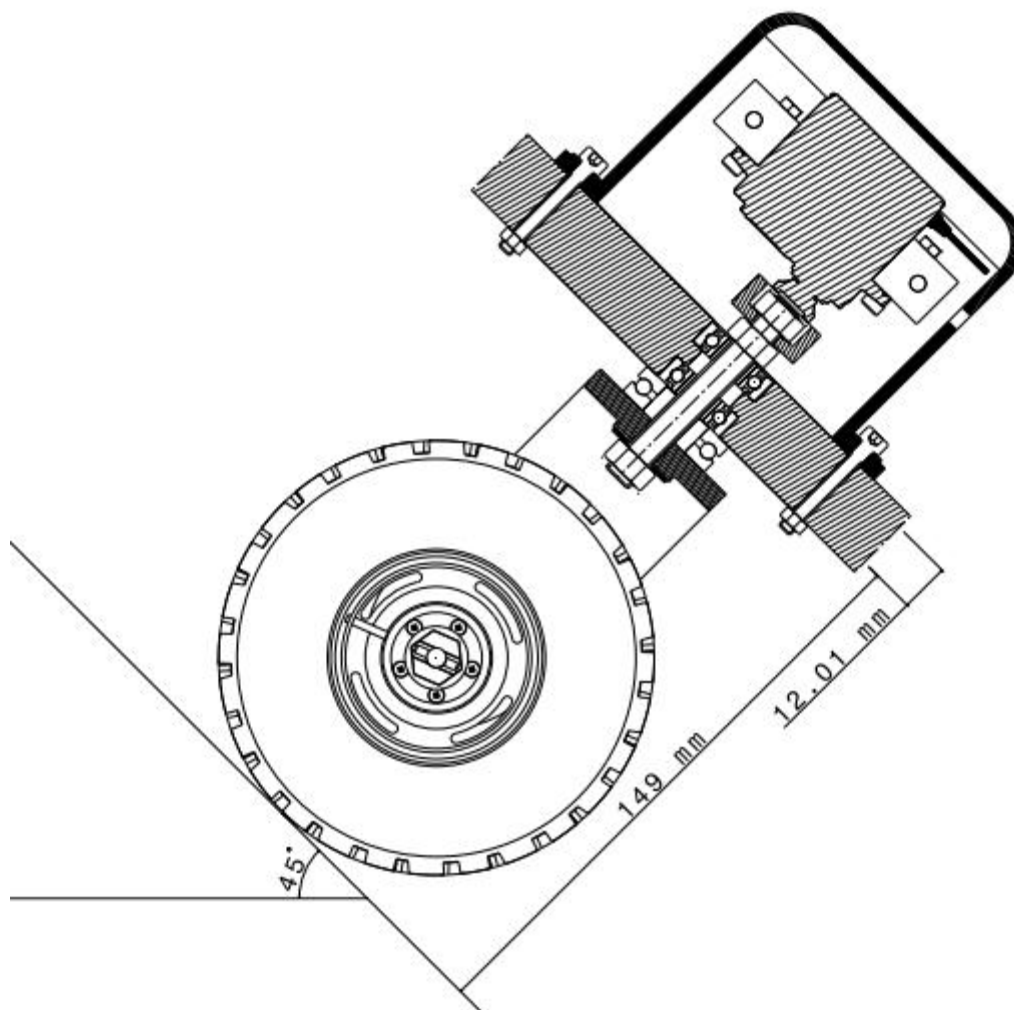


Figura 131. Vista en sección del conjunto, cuando este se sitúa trabajando en una pendiente.

La masa total del vehículo es de 20.49 kg , que se repartirá entre las cuatro ruedas, de forma que $\frac{20.49}{4} = 5.12 \text{ kg} = 50.23 \text{ N}$ por lo que la descomposición de dicha fuerza es de 35.52 N en dirección paralela a la superficie y de la misma magnitud en dirección normal a la superficie. La componente normal la soportará el rodamiento axial, mientras que la componente paralela a la superficie la soportará ambos rodamientos axiales. Así, el problema se analiza considerando los rodamientos dos rodamientos radiales con dicha fuerza en el extremo, de la forma que se ilustra en Figura 132:

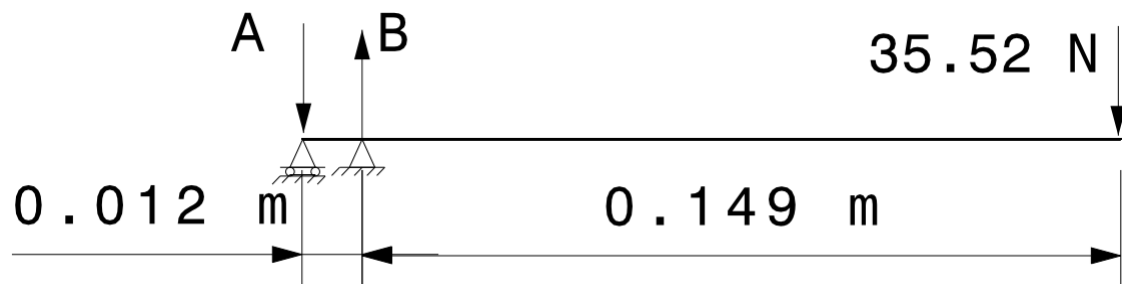


Figura 132. Diagrama de fuerzas para el eje que soporta la rueda.

$$\sum M_A = 0 \rightarrow -35.52N \cdot (0.149 + 0.012) + R_B \cdot 0.012 = 0 \rightarrow \boxed{R_B = 476.56N}$$

$$\sum F = 0 \rightarrow 476.56 - 32.52 \rightarrow \boxed{R_A = 441.04N}$$

Por lo que, en una situación estacionaria y de velocidad constante, será la anterior la fuerza a la que se someten los rodamientos. Si suponemos una aceleración del vehículo, a la fuerza resultante que se ejerce sobre el neumático tendremos que sumarle la fuerza debida a la aceleración de la masa que soporta dicho elemento. La fuerza como consecuencia de la aceleración sufrida será $F = m \cdot a$, donde la masa será $20.49/4 = 5.12kg$ por lo que si suponemos una aceleración de $2m/s^2$ resultará una fuerza de $F = 5.12kg \cdot 2m/s^2 = 10.24N$, que se sumarán directamente a la fuerza del extremo de la rueda de valor $35.52N$. En este caso, más desfavorable que el anterior se tendrá una fuerza resultante sobre los rodamientos de $\boxed{R_B = 613.94N}$ y $\boxed{R_A = 568.18N}$

Esta fuerza es útil para comprobar que se cumple según las especificaciones del catálogo de rodamientos proporcionado por el fabricante (Bearing). Los valores que se tiene, para la carga estática es de $1.4kN$, mientras que para la carga dinámica un valor de $3.4kN$

16.2.4.9.4. Comprobación del eje que soporta la rueda

Con el diagrama anterior de la Figura 132, se realiza el diagrama de flectores para estudiar el momento máximo que se produce en dicho elemento, se omite por su simplicidad. El momento máximo se obtiene en el apoyo B con un valor de $-6.82Nm$ si se considera el criterio de signos el cual flexión positiva sea el que produce tracción en

la fibra inferior y compresión en la superior. Se repite el análisis como el realizado en el caso del perno. En este caso la sección efectiva será de 6.466 mm

Con Navier $\sigma_{flexión} = \frac{M}{W_{ela}}$, al ser una sección circular

$$W_{ela} = \frac{I}{r} = \frac{\frac{\pi \cdot r^4}{4}}{r} = \frac{\pi \cdot r^3}{4} = \frac{\pi \cdot 3.233^3}{4} = 26.54 mm^3$$

Por lo que al sustituir el momento de 6.82 Nm queda que

$$\sigma_{flexión} = \frac{6.82 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{26.54 \text{ mm}^3} = 257 \text{ MPa} .$$

Por lo que si se trata de una varilla roscada o perno de un acero bajo al carbono no cumplirá, ya que excede de 227 MPa (Budynas, y otros, Octava Ed. 2008). Así, se requiere un sujetador o perno con una calidad superior, como puede ser la 8.8 (según la norma ISO898-1). Dicha calidad representa el primer número multiplicado por 100 la resistencia última en MPa, por lo que un tornillo podrá soportar 800 MPa hasta su fractura. El segundo dígito de la nomenclatura anterior, en este caso el 8, indicará que el 80% del producto anterior dará el límite elástico. Por lo que la máxima tensión que podrá soportar el perno de dicha calidad sin plastificar será de 640 MPa, por lo que no plastificará con la estimación de cargas anteriores.

Hay otra fuerza, que produce un momento y somete al perno a tracción, esta es la que produce el peso del conjunto si el vehículo se encuentra en pendiente. Es decir, al existir una fuerza paralela a la superficie, generará una tendencia a vuelco que por un lado se compensa, con la carga estimada anteriormente de la flexión en el pasador. Y por otro, el momento que se genera como consecuencia de la deflexión de dicho pasador, al generar este una flecha, o deformada hará que en un extremo del rodamiento axial exista una carga de compresión por un lado y otra de tracción por otro. Dicha carga de tracción la soporta el perno, y esta carga de tracción es generada al considerar el rodamiento axial articulado en el lado donde se da la compresión y en el caso de que no exista un apriete del rodamiento axial con la superficie en la que se apoya. Esta carga será de baja magnitud, minimizando esta con un correcto asiento del rodamiento axial y apriete del perno. Dicho apriete generará una tensión positiva de tracción en el pasador, además de trabajar a cortante dicho perno para soportar la carga paralela a la superficie.

16.2.5. Suministro controlado del conducto que comunica ambos vehículos

Para evitar que se interfiera negativamente el conducto que comunica ambos vehículos se propone un sistema controlado, que de forma sencilla le suministre esta, según se requiera.

Se evita la situación en la cual el vehículo aéreo al ascender o descender produzca interferencias con elementos externos que hagan crear una situación de riesgo. Esto es, si el vehículo aéreo sube, podrá arrastrar (en cierta medida) el conducto que lo une con tierra, si este posteriormente desciende, el conducto quedará arrastrado por el suelo o por los elementos que tenga en su inferior. Es claro que, si el conducto tiene contacto con el suelo o por la masa foliar que tiene bajo sí misma, impedirá realizar correctamente la tarea.

El sistema que proporciona el conducto de fluido fitosanitario se compone de:

- Sensor fotoeléctrico infrarrojo.
- PLC
- Servo
- Válvula que permite la rotación entre conductos
- Rodamientos

El sistema se ilustra como sigue:

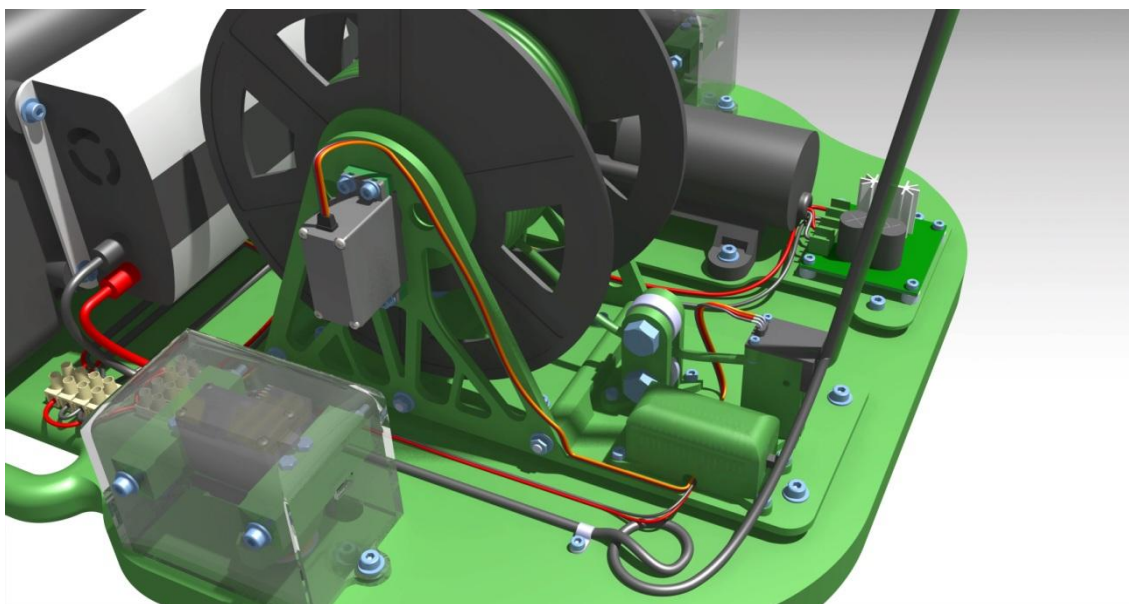


Figura 133. Vista general del sistema propuesto, ya implementado en el vehículo de tierra.

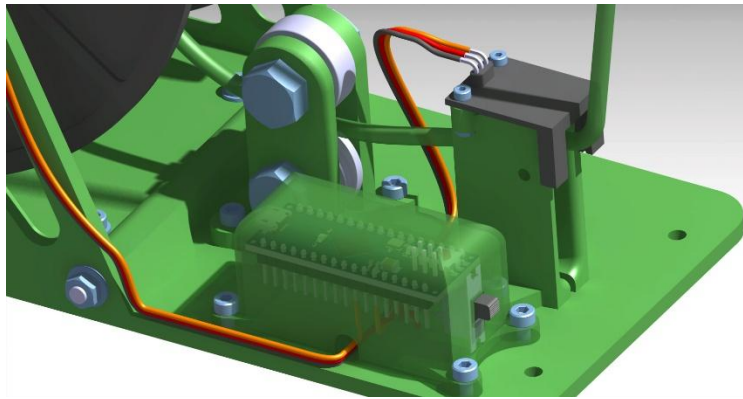


Figura 134. Vista general del conjunto. Se aprecian los rodamientos que guían el conducto, además del Arduino mini con sensor fotoeléctrico.

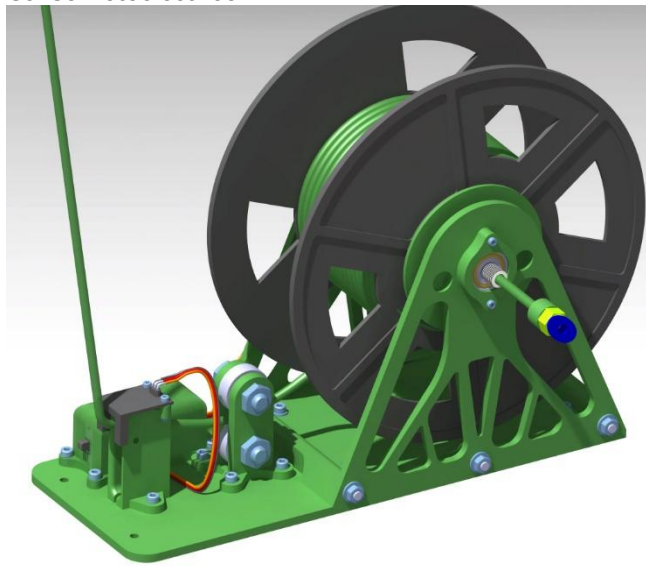


Figura 135. Vista general del conjunto. Se aprecia como el eje de rotación que soporta la bobina de conducto debe de ser hueco, permitiendo la rotación, para ello se requiere de una válvula neumática con un adaptador.

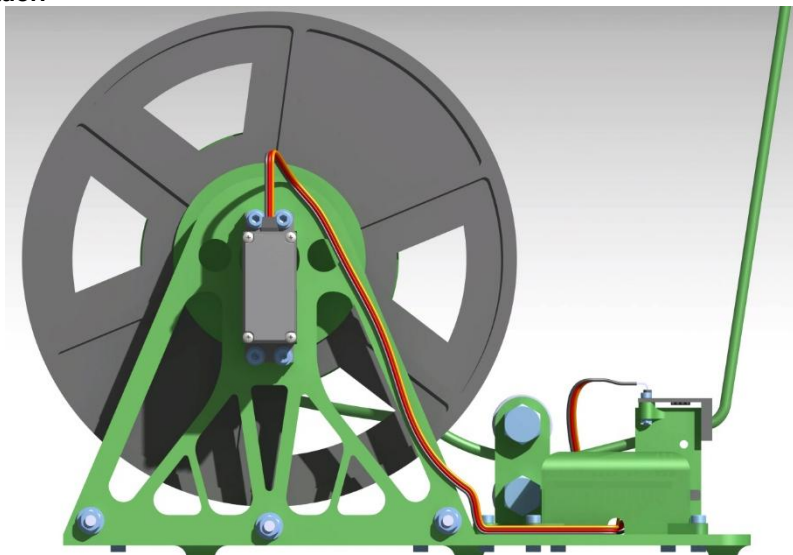


Figura 136. Perfil del dispositivo. Se muestra el servomotor que acciona la bobina de conducto, además de la trayectoria seguida por el conducto.

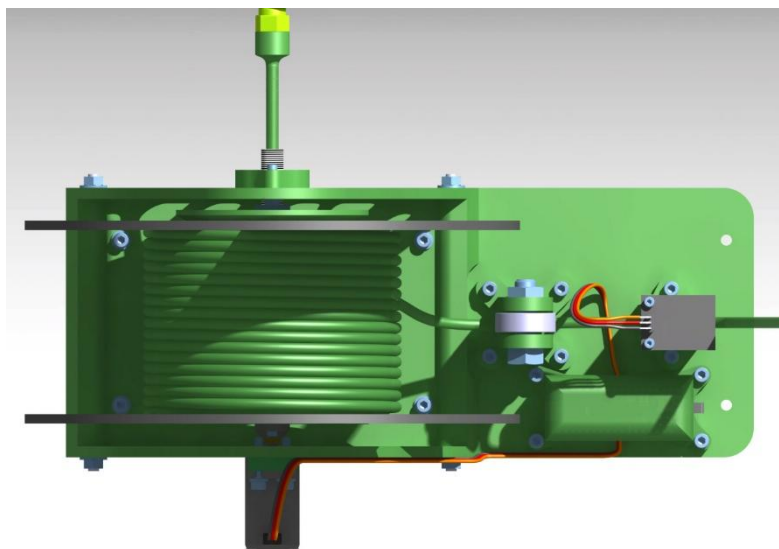


Figura 137. Planta del dispositivo

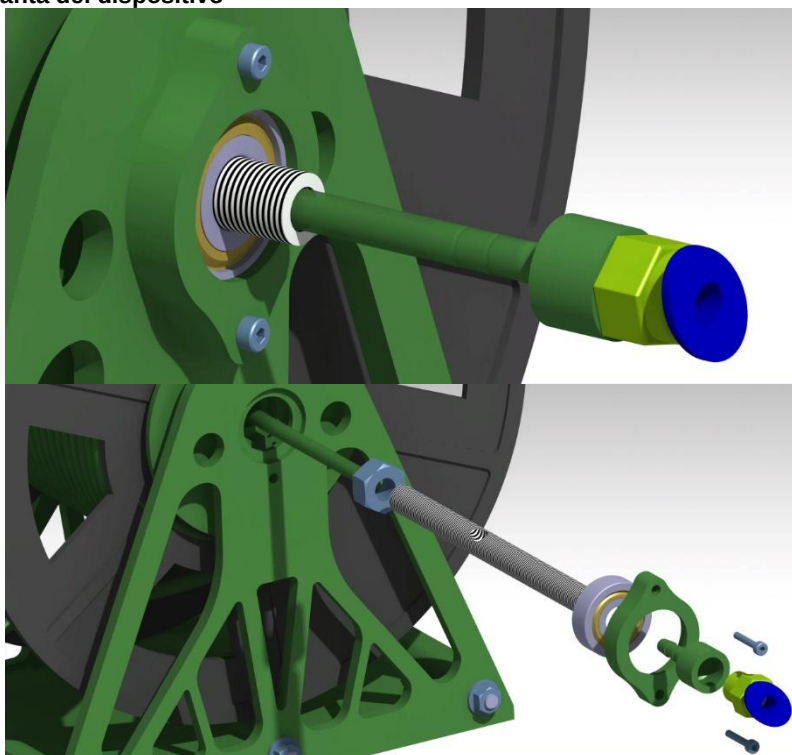


Figura 138. Vistas en detalle del eje de rotación del mecanismo y soporte de la bobina.

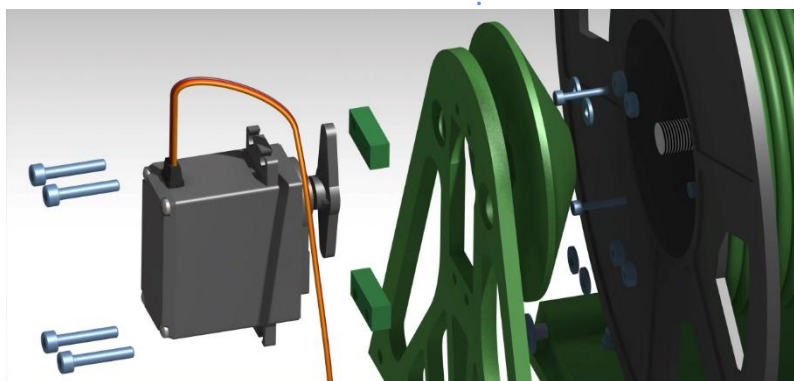


Figura 139. Ensamble del servomotor que acciona la bobina de filamento a través del cono.

El mecanismo consiste en un sensor de correlación fotoeléctrico de infrarrojos Figura 140.

Si este objeto que se interpone entre el emisor y el receptor es el conducto, se puede determinar el estado tensional de dicho conducto.

Es decir, se parte de la situación en la que el vehículo aéreo se encuentra más alto que el vehículo terrestre, y como consecuencia de la masa del conducto, por la gravedad, se ejerce una fuerza hacia abajo. Por lo que el conducto es sostenido por el vehículo a una determinada altura y tenderá a adoptar su posición de mínima energía, mientras que si ejercemos sobre ella una fuerza de tensión este ascenderá, y con el sensor anterior se detecta esta ascensión, accionando el servomotor que hará girar la bobina de filamento.

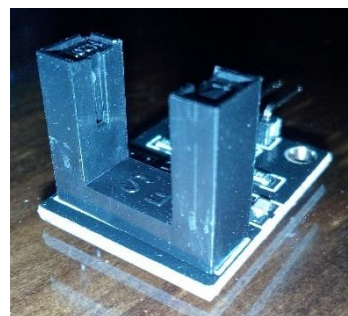


Figura 140. Sensor fotoeléctrico LM393 con octocoplador H2010

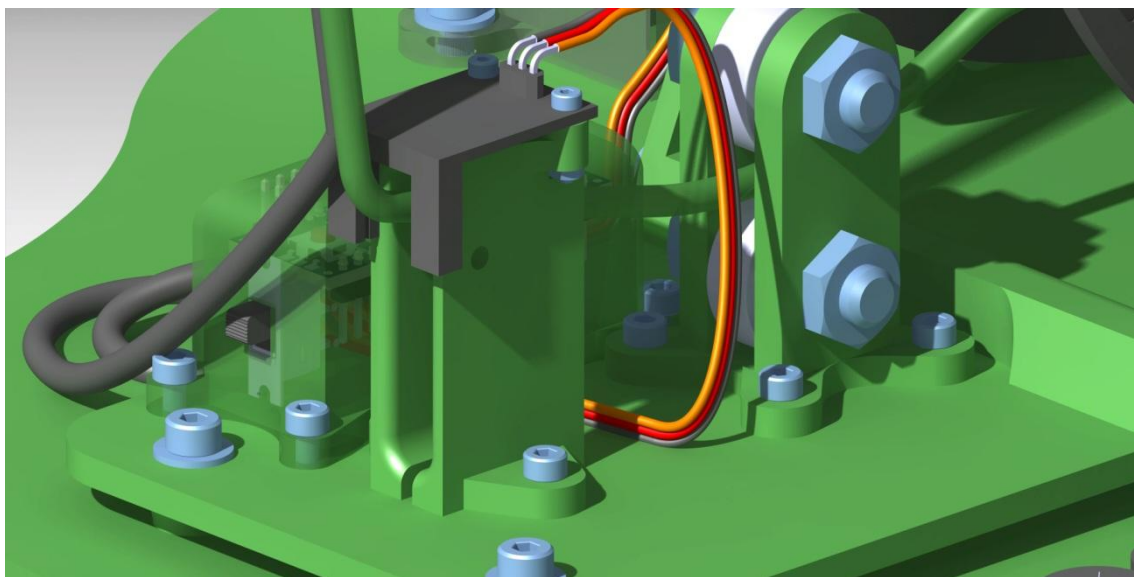


Figura 141. Detalle del sistema deslizante con sensor fotoeléctrico

Si el conducto se encuentra tensado porque el vehículo aéreo tira de esta de forma ascendente, el sensor lo detectará y el PLC accionará el servomotor que acciona a su vez el rollo de manguera. Mientras que, si el vehículo aéreo desciende, o no se ejerce tensión sobre la manguera, el sensor se abrirá y comenzará a liar dicha conductor. De esta forma, si solo se dispone de un sensor se realizará un constante movimiento en la bobina que lía la manguera. Si se disponen de más sensores se podrá regular de forma proporcional el movimiento de la bobina, de forma que si el sensor inferior se cierra comenzará a liar, si se alcanza el sensor intermedio se parará, mientras que si se alcanza el sensor superior

comenzará a desliar. De esta forma se asegura que no se producen interferencias del conducto con otros elementos.

Todo el conjunto es controlado por Arduino, con la necesidad de alimentar el servomotor de forma independiente, ya que la corriente que suministra no es suficiente para mover este.

Como una de las posibilidades es suministrarle la corriente necesaria para mover el vehículo el sistema que suministra la manguera de fitosanitario se puede generalizar para que también le suministre corriente eléctrica. Bien con otro sistema igual que el anterior, pero en el cual solo uno sea Máster y otro esclavo. Por tanto, no necesitaría ningún sensor y se podría poner con otro motor conectado en paralelo. Este segunda bobina podría contener en su extremo dos pistas de material conductor, como baquelita de cobre, en el cual permita hacer contacto y transmitir corriente eléctrica a la vez que permita girar. Es decir, aprovechado el fundamento en el cual están basados los potenciómetros giratorios.

Como se ha mencionado anteriormente no se llevará acabo la fabricación del vehículo anterior, ya que se extendería demasiado de los objetivos del documento. Tan solo se ha desarrollado el texto para justificar la viabilidad del proyecto, existiendo mejoras en todas las ideas propuestas que mejoren el funcionamiento.

15.1.1. Propuestas de mejora en vehículo terrestre

La presente opción es una forma sencilla de realizarlo ya que también se puede realizar mediante la programación. Esta última consistiría en conocer la posición del vehículo aéreo, y terrestre (mediante un GPS cada vehículo) y sincronizar ambos para que la distancia no sea mayor a una cierta cantidad definida por el operario. De forma que, puede programarse de manera que el vehículo aéreo sea el máster y el terrestre el esclavo. De esta forma habría comunicación en tiempo real entre ambos vehículos y el vehículo terrestre se movería según las indicaciones que le indique el PLC comunicado con el vehículo aéreo. Otra alternativa, más sencilla y eficaz es realizar la programación de la trayectoria del vehículo terrestre.

La opción de programar ambos vehículos de forma independiente también es válida, ya que le indicaríamos la ruta que deben llevar los vehículos, de esta forma no habría comunicación entre ellos, pero ambos deben implementar GPS. Esta opción es más sencilla y sería la que se implementara a priori, ya que además es segura y eficaz.

17. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

17.1. Medios de fabricación

En cuanto al diseño de los componentes se ha realizado en base al método de fabricación, en el caso de la placa se estudia se ha realizado para que se pueda fabricar mediante infusión, así como para las de prototipado rápido se han diseñado evitando la utilización de material de soporte. El material de soporte si es necesario se añade, pero siempre se debe de evitar, ya que reduce la calidad superficial del componente, además de suponer un gasto innecesario al ser material que hay que remover. Por tanto, se evitan geometrías en voladizo donde no se tengan radios de curvatura, que harán que el material se desprenda.

17.1.1. Fabricación en material compuesto

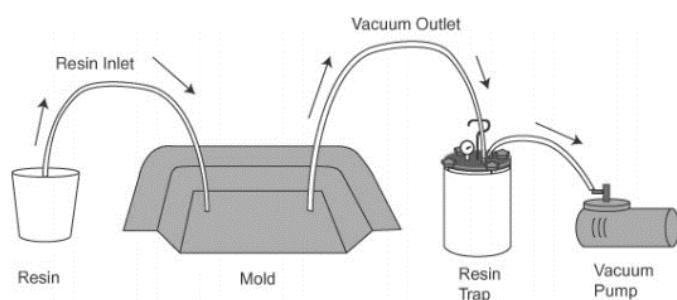


Figura 142. Proceso genérico de fabricación de infusión por vacío

Se propone la fabricación de algunos componentes mediante infusión o vacío. En nuestro caso, al tratarse de un prototipo se empleará prototipado rápido, teniendo como objetivo la fabricación final en material

17.1.2. Fabricación mediante prototipado rápido

Las impresoras utilizadas en su fabricación son Ultimaker 2 Extended, Witbox, prusa i2 y JCR 1000, siendo tres de ellas propiedad del departamento Rapid Prototyping, Andaltec (Plástico).

En cuanto a las limitaciones físicas de volumen para imprimir, serán de 410x205x200 mm para la prusa i2, 223x223x305 para Ultimaker 2 Extended+, 297x210x200 para Witbox y 1000x600x600 mm para JCR100. El coste estimado de las piezas se ha realizado considerando el precio del kilogramo de material a 20 €.

17.1.2.1. Selección del material

Teniendo el CAD de lo que se quiere conseguir será sencillo fabricarlo mediante FDM (Fused Deposition Modeling), también conocidas como impresoras 3D.

Como material a fundir se utiliza PLA3D850 por su facilidad de impresión y propiedades mecánicas, en todas las piezas se emplea dicho material ya que nos proporciona mejores propiedades mecánicas que el ABS, con las ventajas del PLA.

En la siguiente tabla se comparan los tres materiales mencionados:

		ABS	PLA	PLA3D850	Unidades
Resistencia a la rotura (IZOD)	ASTM (D256)	26	20	40	kJ/m ²
Tensión última	ASTM (D638)	458	362	668	kg/cm ²
Dureza superficial	ISO 2039-1	97	85	88	MPa
Resistencia térmica	ISO 306	105	75	85	°C
Densidad	ISO 1183	1,04	1,24	1,24	g/cm ³
Resistencia a flexión	ISO 178	663	485	1284	kg/cm ²

Tabla 3. Fuente: catálogo SmartMaterials3D.

17.1.2.2. Preparación de modelos

Una vez que tenemos el modelo CAD de los componentes a fabricar, se exportará la geometría a *.stl, cerciorándonos previamente de tener la resolución del CAD en el punto deseado.

Como generador de códigos ISO e interfaz de impresión hay multitud de software que nos facilitan la labor, como son el Cura, Repetier Host, CraftWare, ReplicatorG, Skeinforge, KISSlicer o Simplify3D. En el presente TFG se utilizará Cura y Simplify3D, siendo el primero muy sencillo de utilizar, a la vez de rápido, por lo que para muchas piezas es útil, en cuanto a que estamos fabricando piezas de un prototipo y esas piezas no son finales, interesando no gastar demasiado tiempo en la preparación de los códigos. Cuando dicha pieza si valla a ser utilizada en el prototipo final y queramos que tenga unas propiedades más específicas se utilizará el Repetier, ya que el operario tendrá más opciones de control sobre los parámetros definidos. Esto es, ambos generan el código de la misma forma, pero en el primero no tenemos tanta libertad de selección de parámetros, es decir, se tienen los parámetros básicos, pero con el segundo además de tener los parámetros del primero se tienen más, siendo los más importantes: relleno interior en

panel de abeja, relleno interior con malla rectangular en la que seleccionamos el ángulo de orientación de las fibras, etc.

17.2. Vehículo aéreo

17.2.1. Extremidades o arm

Por las dimensiones de las extremidades del vehículo se recurrió a JCR1000. Realizando la impresión en dos materiales. Se emplea PLA como material estructural y HIPS Support como material de soporte, este material es soluble en limoneno. Ello nos permite tener un acabado superficial mucho mejor del que se podría tener si se tiene el mismo material estructural y de soporte, ya que se realizan las trayectorias de material de soporte, pero antes de realizar la primera capa en voladizo, imprime cuatro capas al 100% de material de soporte, por lo que el material estructural se apoyará sobre una base sólida de material de soporte. Esto se denomina material de soporte denso, en la siguiente imagen aparece como color gris:

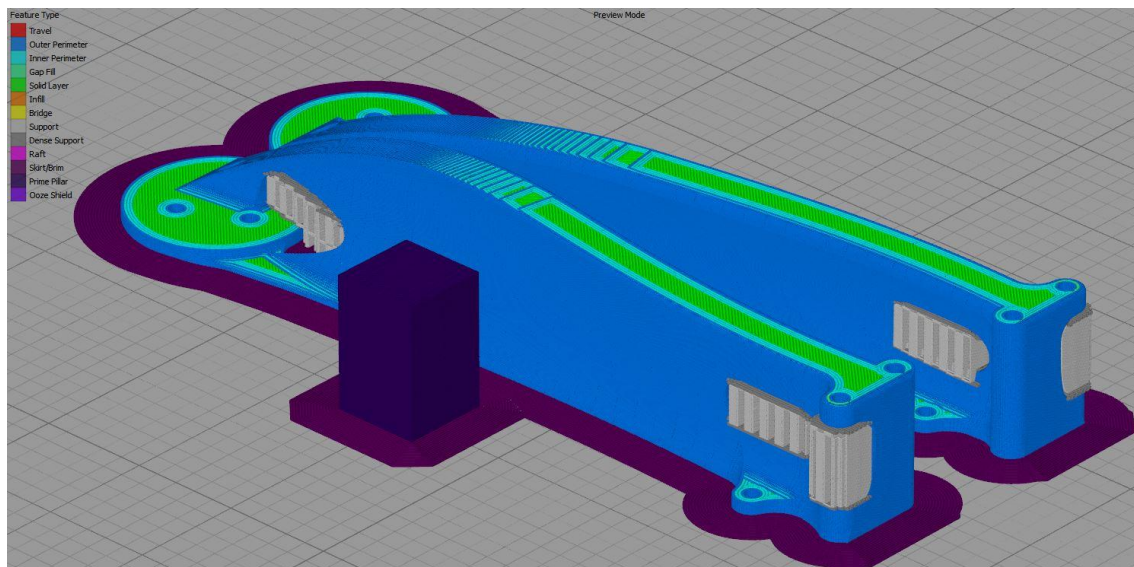


Figura 143. Distintas partes de la pieza a fabricar. En cada una de ellas se definen parámetros de trabajo distintos.

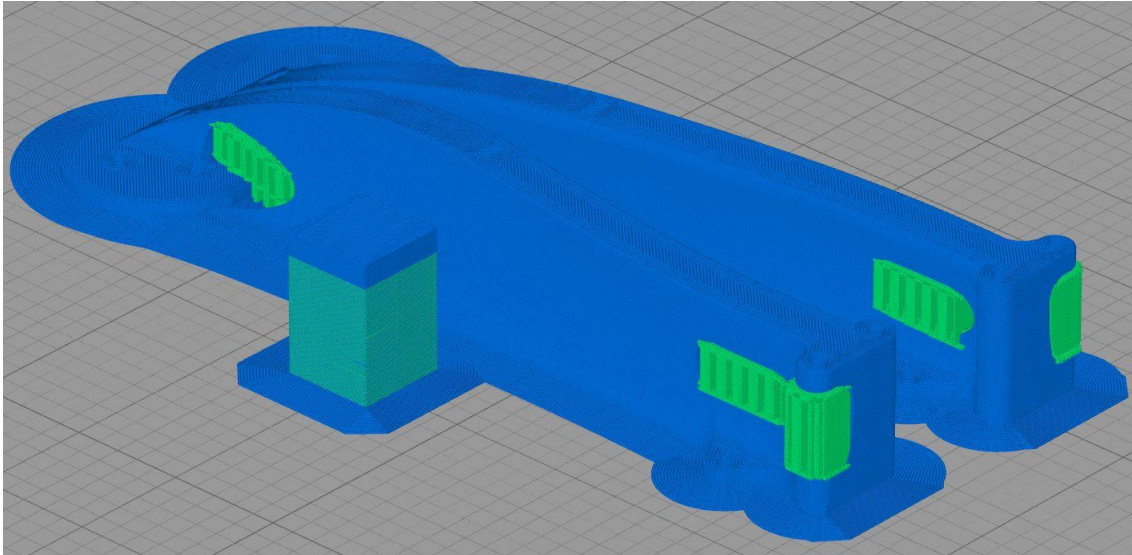


Figura 144. Herramientas utilizadas durante la impresión. Tool 1 será la pieza estructural, tool 2 fabricará el material de soporte. En la torre de limpieza se realizan capas alternativas de ambas herramientas y materiales.

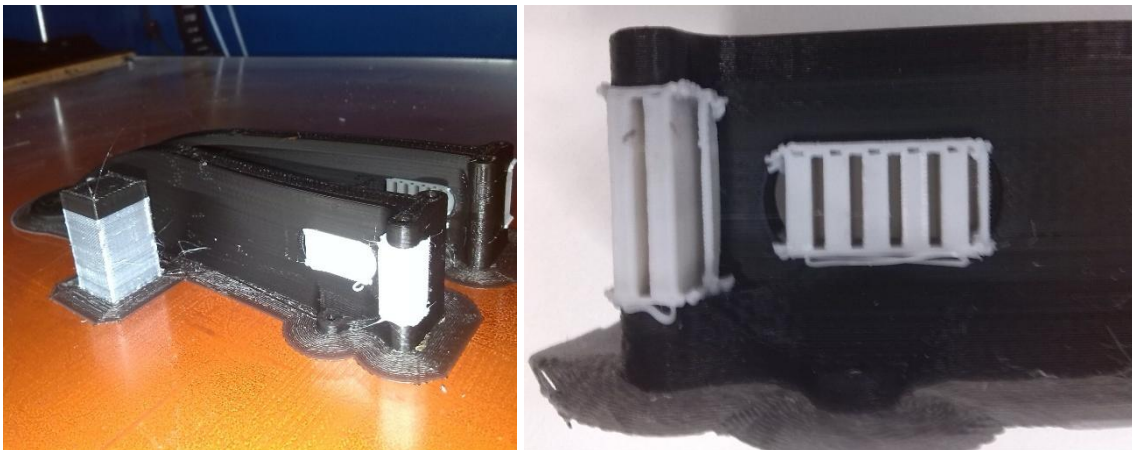


Figura 145. Componentes fabricados (izquierda). Detalle del material de soporte (derecha).

Una vez retirado el material de soporte y el brim generado. Además de lijado, acabando con lija de grano 600, y finalmente pintado con aparejo en spray en color blanco y negro (para poder distinguir la orientación del vehículo) queda como se muestra:



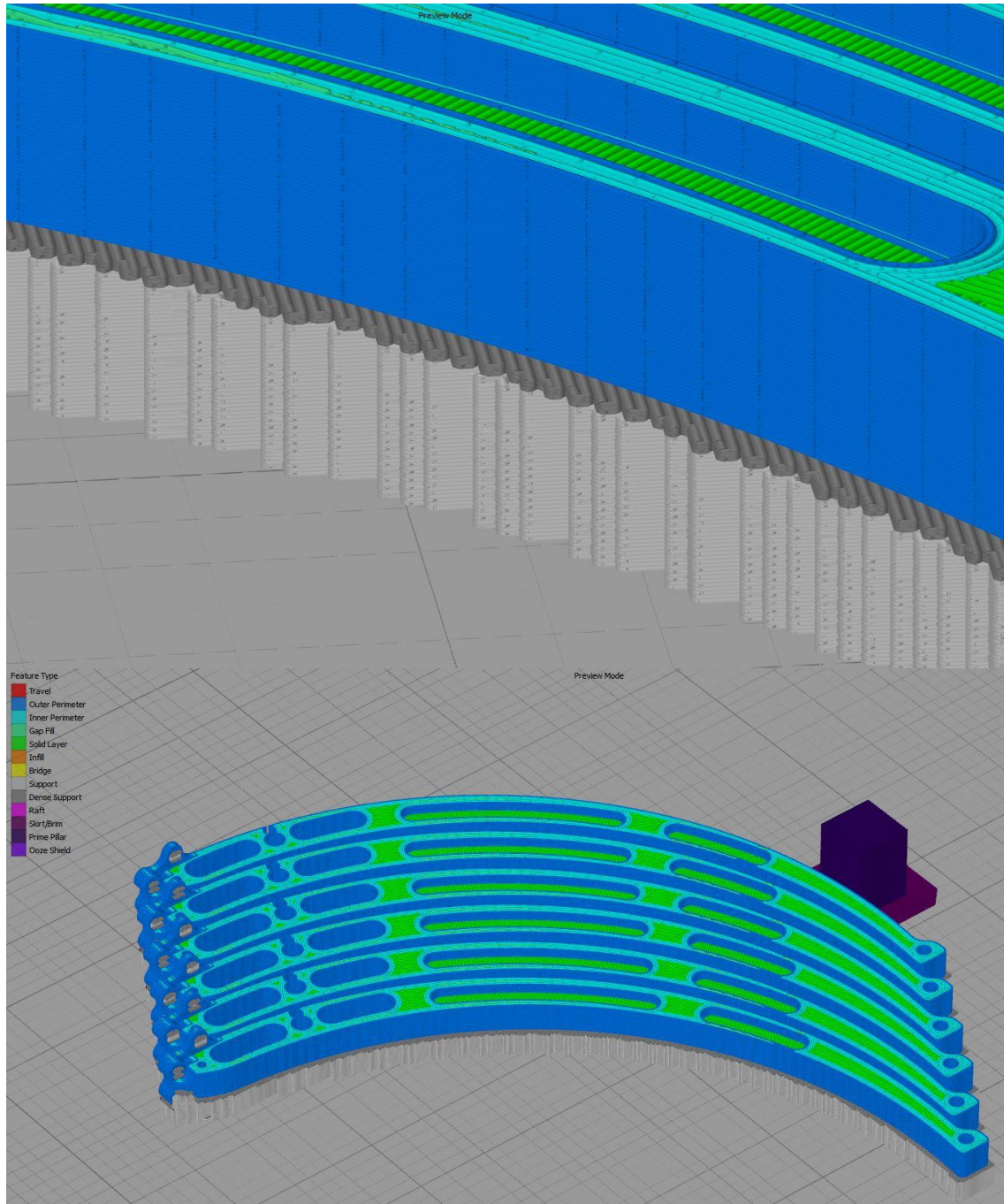
Figura 146. Componentes tras el post-procesado.

17.2.2. Tren de aterrizaje

Se diseña el tren de aterrizaje como se muestra en las siguientes imágenes



Para su fabricación



17.2.3. Montaje

Una vez seleccionados todos los componentes se realizará el montaje de estos. Para ello, como en casi todos los dispositivos que se componen de parte mecánica y eléctrica, se implementa primero la parte mecánica.

Para ello se comienza con la parte central inferior, a la que se le acoplaran las extremidades del vehículo, teniendo en cuenta la correcta orientación, Figura 149. Posteriormente se realizará el montaje del tren de aterrizaje, para después pasar a la parte eléctrica, se realiza el montaje de los motores en todas las extremidades, Figura 148. En nuestro caso elegir todos los motores son iguales y no se tiene que tomar la precaución de situarlos en determinada posición, es decir, usualmente muchos motores implementan el porta-hélices con un determinado sentido de roscado en dicho porta-hélices.

Previamente o posteriormente se preparan los conectores tipo banana de 2.1 mm para dichos motores, así como para los ESC. La utilización de conectores tiene sus ventajas,

- Mayor facilidad de montaje
- Menor tiempo de reparación - cambio de componentes



Figura 147. Conector tipo banana 2 mm (Online)

Además del inconveniente obvio del incremento de peso en el vehículo.

En nuestro caso si se dispondrán conectores entre el motor y ESC, ya que para posibles cambios futuros es rápido y fiable el uso de conectores. Si no se utilizara conectores, antes de soldar los bornes definitivamente hay que probar el sentido de giro de dichos motores e intercambiar dos fases cualesquiera para cambiar el sentido de giro del motor.

Una vez conectados los motores con los variadores, se conecta la alimentación de estos últimos. Se conectan todos los positivos, incluyendo el cable para la conexión de la batería, y se repite para el negativo. Esta conexión también se puede realizar con conectores.



Figura 148. Vista general

El siguiente paso es implementar la controladora de vuelo en el sitio adecuado, para ello se pega con adhesivos adecuados como los elastómeros acrílicos VHB® (3M) o cintas de doble cara (3M). Además, para evitar el desprendimiento de dicha controladora se dota de elementos mecánicos de unión.

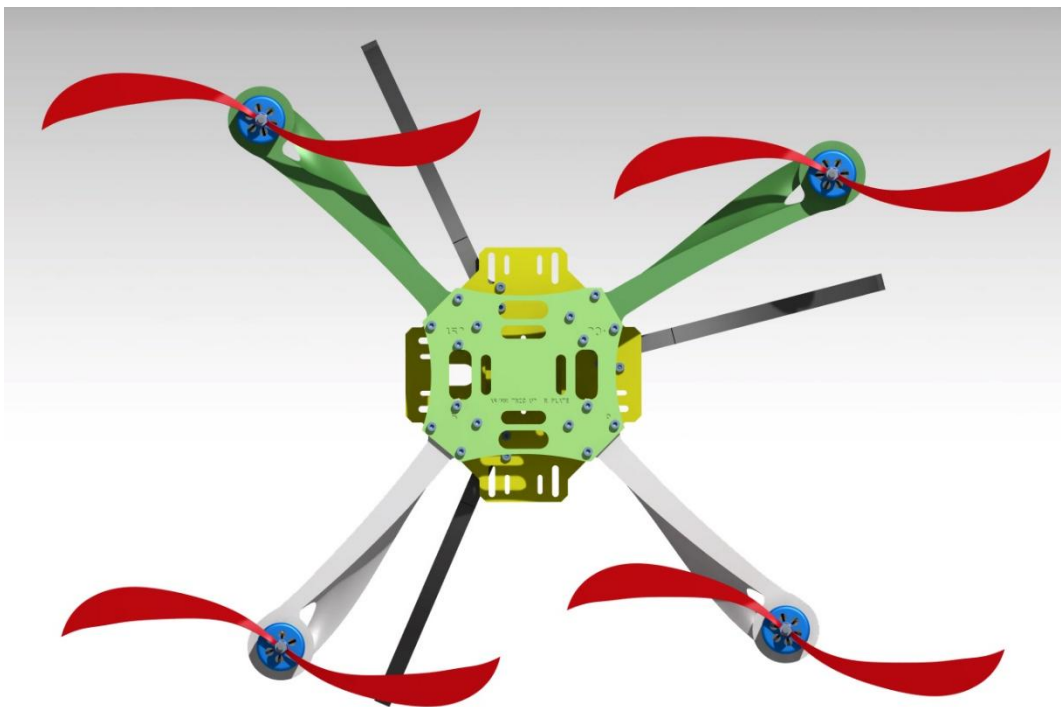


Figura 149. Vista en planta. Como se aprecia los ángulos que forman las extremidades son distintos de 45°, por lo que al montar el deflector hay que tenerlo en cuenta.

Se sujetan los elementos auxiliares al vehículo, BEC, GPS y receptor, realizando el conexionado de los elementos como se indica en los diagramas suministrados por el fabricante.

Finalmente, antes de instalar la placa superior, se prueba el sistema sin hélices, para verificar que funciona de forma correcta. Por último, previa verificación del correcto funcionamiento de la controladora, se instalan las hélices.

17.2.4. Puesta a punto

17.2.4.1. Previa al vuelo

Previo al primer vuelo es conveniente realizar diversas pruebas. Para ello se puede sujetar las extremidades del vehículo al suelo firme, de forma que, de una manera segura se pueda analizar y verificar el correcto funcionamiento del conjunto. Esta prueba no es definitiva, ni es la configuración llevada a cabo para el control será estable o no, ya que al tener estos soportes externos el comportamiento del vehículo será totalmente distinto. Pero este punto es útil verificar que todos los motores giran en el sentido adecuado, verificar que el vehículo responde los movimientos que se le indican, además (mediante el sonido) asegurarse que se está realizando de forma adecuada la estabilización en una posición estacionaria.

17.2.4.2. Durante el vuelo

Una vez hecho esto no se tiene garantizado un vuelo estable, por ello se prefiere un suelo donde se amortigüe los posibles accidentes. Primeramente, se intentará realizar el primer vuelo con todos los sensores activos, ya que se realizará de forma más sencilla. Calibrando en tiempo real el PID con los potenciómetros desde la estación de tierra. Por ello se recomienda que no exista viento.

Una vez calibrados los parámetros los cuales harán un vuelo estable en condiciones en las que no exista viento, quedará calibrarlos en la condición en la que si exista viento. Es por ello que se mantiene la configuración en la emisora para poder variar el PID y se realiza otro vuelo cuando exista un viento moderado (10-20 km/h) y se afinan los parámetros previamente establecidos en el vuelo anterior.

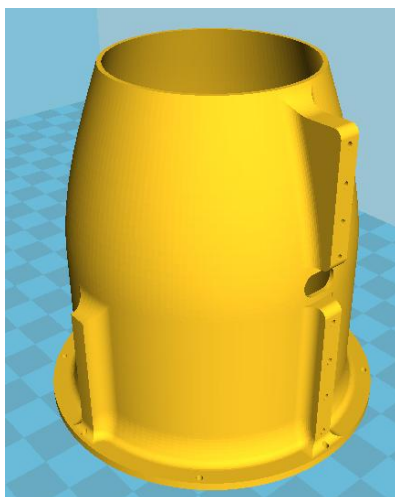
17.2.4.3. Posterior al vuelo

Una vez finalizado el punto anterior se fijarán los parámetros, anotando su valor y eliminando la función de poder variarse desde la estación de tierra en tiempo real. O si se prefiere y tenemos disponibilidad en los canales de la emisora se puede reservar un potenciómetro para una ligera variación del PID, pudiendo ser útil para adaptarlos in-situ dependiendo de las condiciones de vuelo. Es decir, si se mantiene la función se hará en un rango menor, para que si de forma accidental se accionan no se cree una situación de peligro.

Una vez realizado el primer vuelo, y teniendo ya todos los parámetros configurados correctamente para un vuelo estable se retirará la placa superior y se instalará el transmisor, la cámara de video y la telemetría. Esta operación se realiza después del primero vuelo ya que no interfiere en los parámetros de calibración del vehículo y evita poner en riesgo una mayor suma de dinero.

17.3. Deflector tipo I.

En las siguientes imágenes no se ha suprimido el fondo de las fotografías, porque la orientación de la pieza en la superficie de impresión es importante, ya que las piezas se han diseñado teniendo en cuenta esto



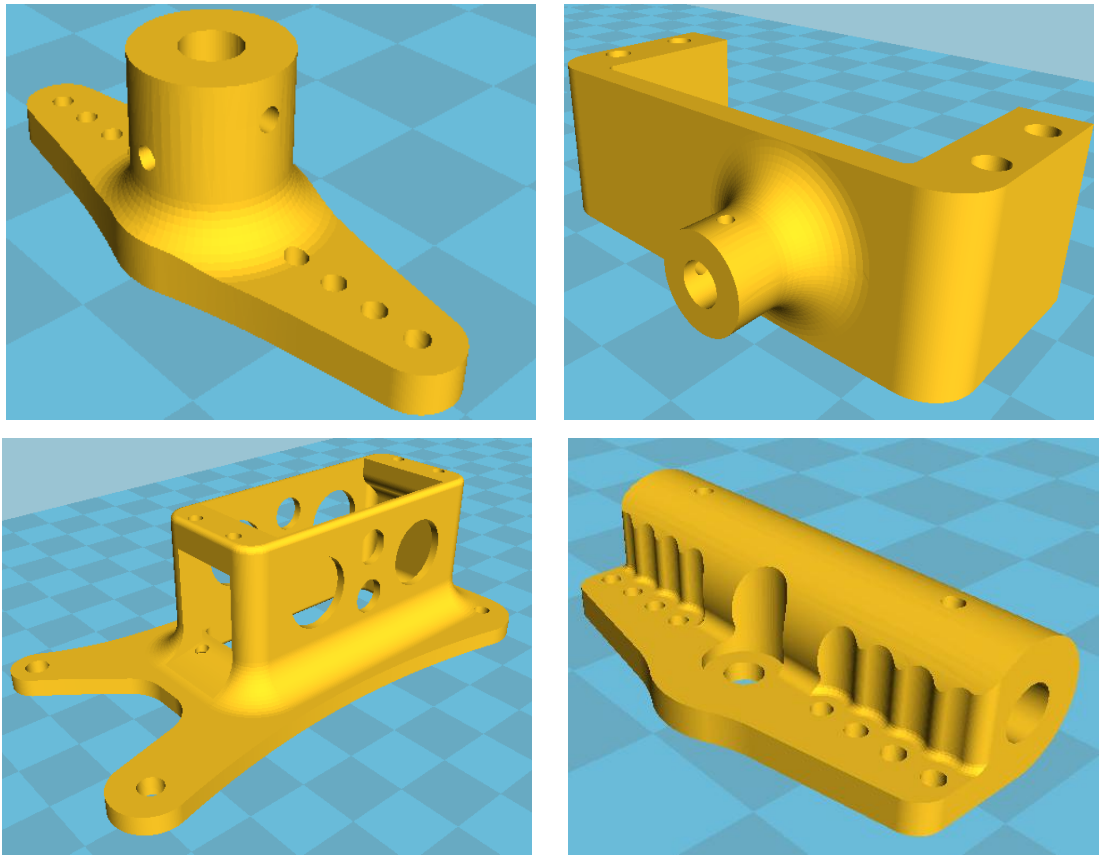


Figura 150. Geometrías a fabricar.

En la siguiente tabla se muestra de forma esquemática y de resumen los parámetros de impresión que se han utilizado para las distintas piezas:

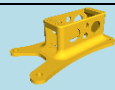
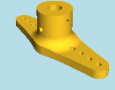
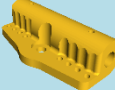
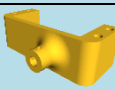
Ultimaker 2 extended +											
Pieza	Tiempo de impresión (min)	Layer height (mm)	Fill Density (%)	Bottom/Top thickness (mm)	Nozzle temperature (°C)	Bed temperature (°C)	Nozzle size (mm)	Material de soporte	Brim (líneas)	Costo (€)	Masa (g)
	92	0.2	100	1.5	195	40	0.4	Si	3	0.38	19
	15	0.15	100					No		0.04	2
	22	0.15	100					No		0.07	4
	45	0.2	60					Si		0.18	9
	192	0.2	100					No	5	0.58	29

Tabla 4. Parámetros de fabricación.

17.4. Deflector tipo II

Se repite el proceso anterior con las siguientes piezas, con la diferencia de que la superficie deflectora se imprimirá en material flexible, también se tiene en cuenta que el precio del material es mayor. Para la impresión de material flexible hay que tener en cuenta que la velocidad de impresión debe de ser más baja (40mm/s frente a los 70mm/s empleados en la Ultimaker con PLA3D850), además debemos tener en cuenta que todas las impresoras no son aptas para la impresión de este material, esto dependerá de la geometría que tenga el impulsor del filamento, ya que si por la trayectoria que sigue el filamento se encuentra con grandes huecos, o zonas donde el filamento no está guiado, este, al ser flexible puede salirse de la trayectoria. Más aún en las primeras capas, las cuales para extruir el filamento se necesita más presión por parte del impulsor de filamento.



Figura 151. Impresión de superficie deflectora con PLA Soft de Orbi-Tech. Se aprecia cómo no recupera la forma tras ser deformado.

Existen materiales con distintos grados de flexibilidad, por ejemplo, la superficie deflectora se imprimió en PLA Soft de Orbi-Tech® (dureza Shore de 94A), no obteniendo buenos resultados, ya que el material no recupera completamente la forma tras ser deformado. Tras esta prueba se imprimió con FlexiSMART (TPU) de FFF con dureza Shore de 97A.

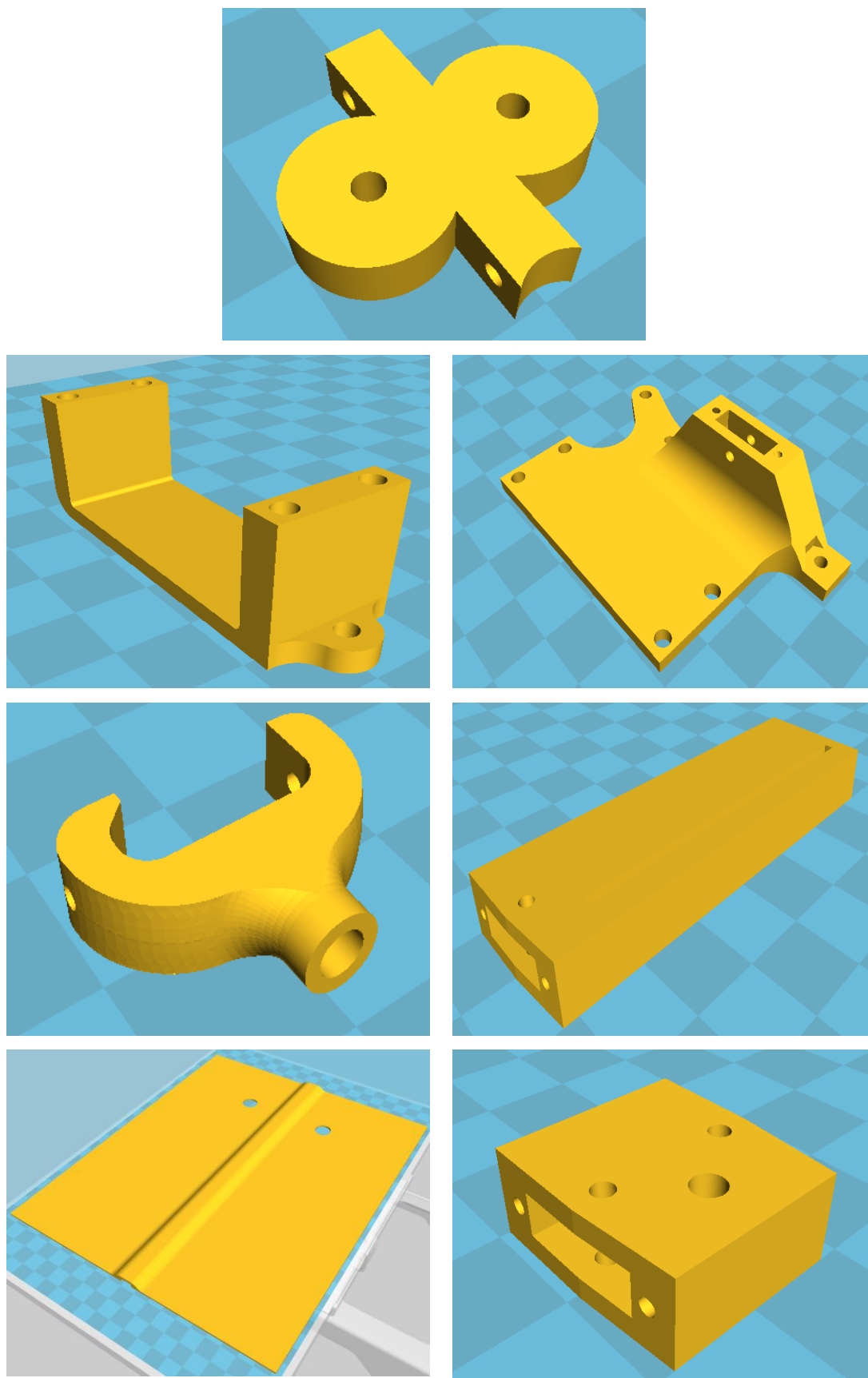


Figura 152. Geometrías a fabricar

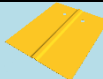
Ultimaker 2 Extended+											
Pieza	Tiempo de impresión (min)	Layer height (mm)	Fill Density (%)	Bottom/ Top thickness (mm)	Nozzle temperature (°C)	Bed temperature (°C)	Nozzle size (mm)	Material de soporte	Brim (líneas)	Costo (€)	Masa (g)
	114	0.15	80	1.5	195	40	0.4	No	3	0.25	51
	11	0.2	80	1.5				No		0.02	4
	23	0.2	80	1.5				Si		0.06	5
	90	0.2	60	1.5				Si		0.23	8
	61	0.2	80	1.5				No		0.16	75
	10	0.15	80	1.5				No		0.02	6
Bq Witbox											
	477	0.2	100	1.2	210	x	0.4	Si	3	1.75	88

Tabla 5. Parámetros de calibración.

Posteriormente se realiza el ensamble de todo el conjunto, utilizando tornillos M2x12 mm. Quedando como se muestra:



Figura 153. Vistas del deflector (izquierda). Comparativa del deflector construido para la prueba experimental inicial y deflector construido posterior al estudio.

18. Parámetros de programación a controlar

18.1. EN UAV

18.1.1. PID

La ganancia del vehículo depende de muchos factores, como el chasis, motores, ESC, masas, errores de construcción en el vehículo, hélices, aerodinámica, modos de vuelo...

En nuestro caso el vehículo propuesto es distinto, por lo que también lo serán los parámetros de vuelo.



Figura 154. Frame Wheel 450 DJI (DJI) ®

Aun así, es más sencillo que si utilizan otras plataformas, ya que el PID se reduce a Basic Gain y Altitude Gain.

- Basic Gain es la respuesta que tiene vehículo según accionamos el control.
- Altitude Gain es la respuesta automática que realmente realiza el vehículo. Es decir, controla muchos más parámetros, de forma que se autoestabiliza.

18.1.1.1. Procedimiento de ajuste PID

El procedimiento para ajustar el PID es sencillo si se realiza con precaución y siguiendo un protocolo, es decir,

- 1- se comienza con los valores de fábrica que nos proporciona el fabricante. Para nuestro caso:

No.	Aircraft	Configuration Information					Basic Gain				Attitude Gain	
		Motor	ESC	Propeller	Battery	Weight	Pitch	Roll	Yaw	Vertical	Pitch	Roll
1	F330	DJI-2212	DJI-18A	DJI-8 Inch	3S-2200	790 g	140	140	100	110	140	140
2	F450	DJI-2212	DJI-30A	DJI-8 Inch	3S-2200	890 g	150	150	100	105	150	150
3	F550	DJI-2212	DJI-30A	DJI-8 Inch	4S-3300	1530 g	170	170	150	140	170	170

Figura 155. Parámetros base de calibración

Los valores anteriores son los que se empleen para realizar el primer vuelo, en nuestro caso la aeronave más parecida es F450. Esto no asegura un vuelo estable, pero asegura unos valores los cuales puedan ser parecidos a los finales y el vehículo pueda despegar. Es obvio que debe de realizarse en un sitio despejado alejado de todo peligro.

- 2- Antes de comenzar el primer vuelo se programa de forma que el piloto sea capaz de controlar las ganancias de los PID en tiempo real. Es decir, el objetivo es que mientras el piloto realiza el primer vuelo pueda variar los PID, y por tanto pueda determinar que parámetros se adecuan mejor. Esto se le indicará como se muestra en la siguiente imagen siguiente,

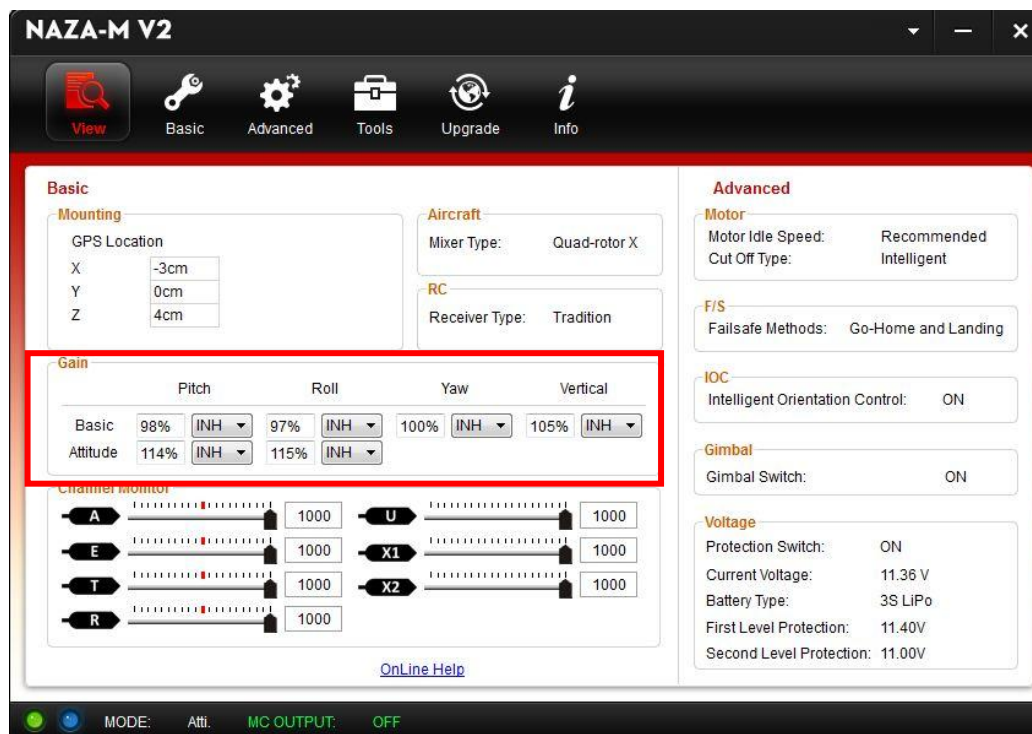


Figura 156. Programación de X1 y X2 para regular desde tierra con potenciómetros

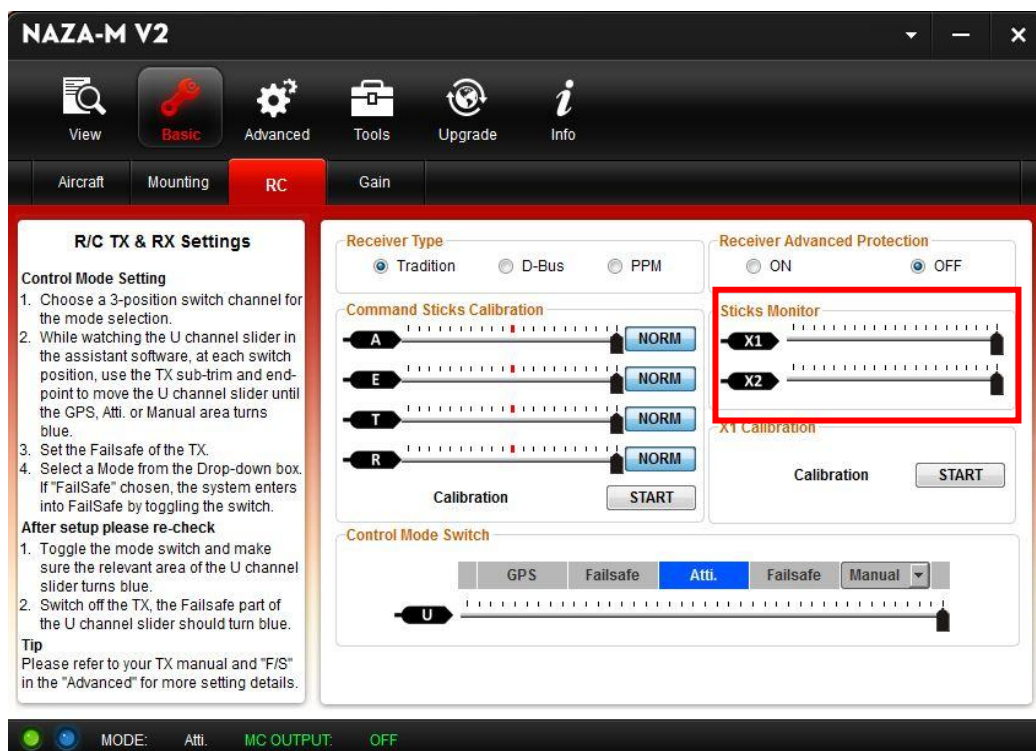


Figura 157. Comprobación del correcto funcionamiento de dichas funciones

Como se aprecia, se puede controlar dos parámetros al mismo tiempo, X1 y X2, por lo que se selecciona en primera instancia el Pitch y Roll.

- 3- El primer vuelo debe de realizarse con precaución, despegando de forma progresiva y controlada. Posteriormente, se ha de ver la evolución del vehículo dependiendo de los distintos valores de ganancia mediante el accionamiento de potenciómetros en la emisora.

Para ello se debe reconocer como se comporta el vehículo y tener claro que se consigue si subimos o la bajamos la ganancia.

18.1.1.2. Influencia de los parámetros

Para modificar la ganancia hay que tener claro que se consigue con esto

18.1.1.2.1. Basic Gain

- Valores bajos de Basic Gain. El multirrotor es muy lento, reaccionará con lentitud a las órdenes del piloto, siendo poco preciso su vuelo.
- Valores altos producirá un movimiento oscilatorio al soltar el stick.

18.1.1.2.2. Attitude Gain

- Valores altos harán que el multirrotor vuelva a su posición rápidamente. Por lo que, si es demasiado alto la inercia del vehículo hará que sobrepase su consigna y deba de retroceder, todo ello bruscamente. La oscilación que se produce aquí es mucho más violenta y rápida.
- Valores bajos harán que el multirrotor tarde en estabilizarse o autoequilibrarse, teniendo grandes amplitudes en las oscilaciones.

Si los dos parámetros anteriores son bajos, el multirrotor será lento, poco ágil y estable, con oscilaciones de gran amplitud.

Si por el contrario los dos parámetros anteriores son altos, será nervioso, brusco, además de inestable.

Para el ajuste de los valores lo ideal es comenzar por valores altos, para poco a poco disminuirlos, ya que, se puede cometer el error de tener un vuelo estable, pero con ganancia básica baja.

- 4- Una vez finalizado el primer vuelo, no se puede modificar el estado final de la configuración que mejor le ha parecido al piloto. Así, cuando se vuelva a conectar la controladora al pc leerá el valor final, pero aún no está guardado en ella.

Aquí es cuando se presentan dos alternativas,

- a. Se inhabilita el control del PID del mando para fijarlos de forma permanente. Así, se tienen dos canales adicionales auxiliares libres, para el control de otros elementos. Esta opción se para el deflector tipo I, ya que se requiere de dos canales para su control.
- b. Se inhabilita el control de Pitch y Roll y se controla el Yaw y throttle o vertical. Se repite el procedimiento anterior para ajustar estas dos

funciones. Normalmente no se requiere de la calibración de estas funciones.

- c. No se inhabilita el control de la ganancia desde el mando, pero sí limitarla en un rango más pequeño. Es decir, la calibración realizada en el punto anterior es la final, pero si dejamos activa esta función, y accionamos el potenciómetro (por error o accidente) se tendrá que volver a recalibrar el vehículo.

Por lo que una buena opción es poder controlar la ganancia en un rango menor, de forma que se pueda variar en función de las condiciones de vuelo, como viento, temperatura... y si se acciona este por error no generaremos una situación de peligro, ya que el vehículo seguirá siendo estable en todo el rango de la ganancia establecido.

Esta opción sería adecuada para el deflector tipo I, ya que al no ser una solución final y tener que realizar cambios constantes en busca de la mejor configuración, es interesante tener control sobre este parámetro durante el vuelo.

18.1.1.3. Parámetros óptimos

Para encontrar unos parámetros óptimos de vuelo, como se ha visto, es necesario realizar pruebas de vuelo. Esto es así, porque no se puede generalizar con unos parámetros concretos, ya que cada vehículo es distinto, distinta distribución de masas, interferencias, tolerancias de montaje, defectos componente, etc. Por ello se necesita la controladora de vuelo, ya que idealmente un vehículo con cuatro hélices en disposición horizontal, perfectamente colocadas, con un idéntico empuje, (sin viento lateral) es capaz de volar de forma estacionaria y controlada. Pero esto no es así, ya que siempre existen desalineamientos y tolerancias mecánicas de fabricación en todos los componentes que harán ser necesario controlar el sentido de giro de los motores hasta para la situación más sencilla de vuelo.

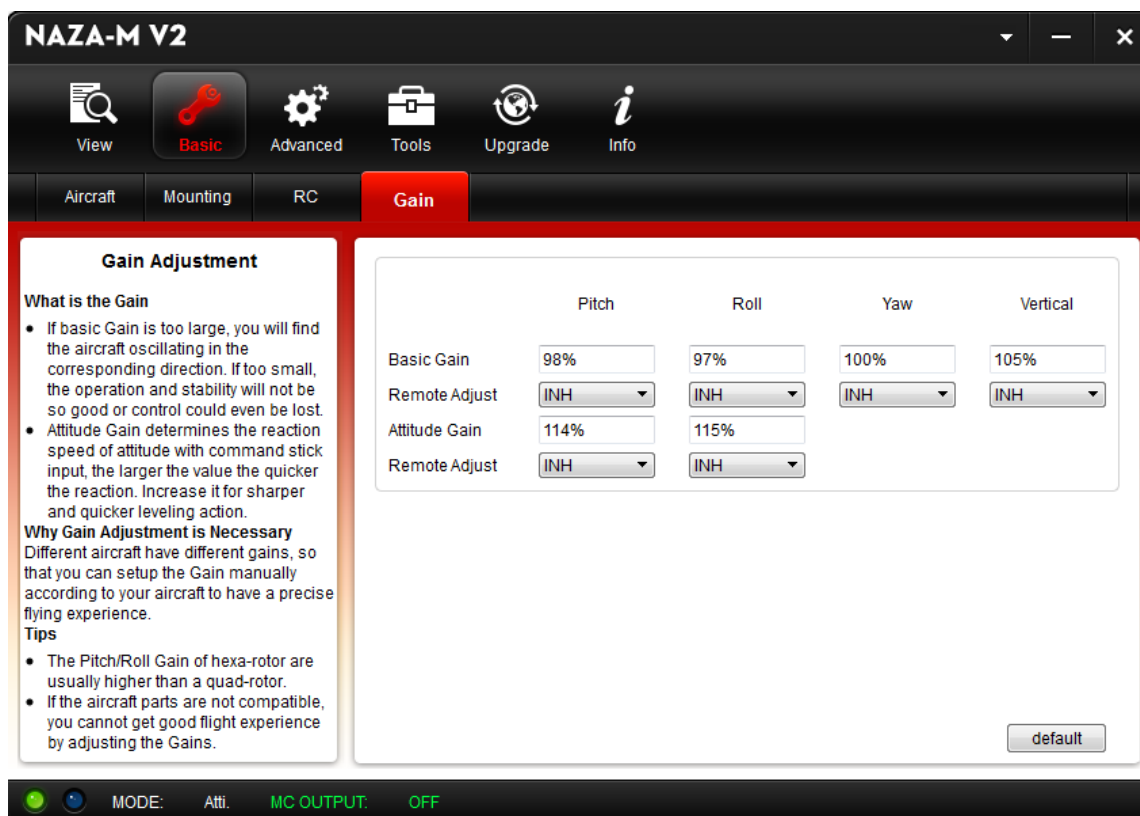


Figura 158. Resultado de los parámetros de calibración

18.1.1.4. En deflector

Como se ha comentado anteriormente, el problema de programación y relación con el vehículo se ha reducido todo lo posible, ya que, sino es inabordable el problema, no teniendo sentido para un prototipo.

Por ello, el parámetro de control en deflector se realiza de forma manual, siendo el piloto el que los acciona (no siendo este el objetivo final).

En el deflector tipo I se tienen dos controles, que accionará el roll y pitch del deflector, para de esta forma cambiar la orientación del deflector. Se utilizarán los potenciómetros X1 y X2 que se han explicado anteriormente.

En el deflector tipo II se tiene un solo control, modificando el estado de deflexión de este. Se emplea uno de los dos potenciómetros disponibles, ya que el otro está ocupado para el control de la ganancia.

19. PRUEBAS EXPERIMENTALES

19.1. Previas a la realización del estudio

Como se mencionó en la introducción, el primer paso antes de comenzar a trabajar en el proyecto, fue realizar pruebas experimentales, que nos permitieran cerciorarnos si la idea era viable.

A continuación, se adjuntan las imágenes tomadas en las primeras pruebas experimentales



Figura 159. Primera prueba de vuelo, con indicador de la dirección del viento. Se aprecia como lo deflecta y el sistema propuesto en este documento es factible.



Figura 160. Situación del primer deflector, previo al vuelo.



Figura 161. Deflector simplificado, fabricado con varilla roscada, cartón y soporte en ABS.

20. CONCLUSIONES

En este TFG se considera que se han cumplido los objetivos y requerimiento propuestos en los primeros puntos. Aun así, se trata de un primer prototipo, con posibilidades de mejora, además de poder mejorarse con el avance de las tecnologías, como baterías, ya que actualmente es el factor limitante y por el que se ha propuesto el vehículo autónomo.

En este TFG se han llevado a cabo todas las fases necesarias para el desarrollo de un producto desde un punto de vista ingenieril, ya que la última fase de marketing no se ha llevado a cabo.

El dispositivo propuesto podrá dar solución a aplicaciones concretas en la aplicación de fitosanitario como los que se mostraron en la Figura 1.

Como consecuencia de este trabajo se ha realizado la patente: *dispositivo para la aplicación de productos fitosanitarios*.

✓ Ventajas

Las ventajas se pueden esquematizar de la siguiente manera:

- Eficiencia en la aplicación del producto fitosanitario
 - El movimiento del deflector es capaz de direccionar el aire para aplicarlo en aquellas zonas que así lo requieran. Reduciendo al máximo las pérdidas por deriva.
 - Se implementará otro movimiento secundario generador de turbulencia, favoreciendo la aplicación de este en toda la superficie de la hoja.
- Solventa la aplicación fitosanitaria en geometrías de masas foliares complejas
 - Totalmente indicado para jardines verticales en los cuales actualmente no existe ningún dispositivo que permita la aplicación de fitosanitarios en ellos.
- Proceso automático.
- Seguro
 - Evita inhalación de producto fitosanitario

✓ Inconvenientes

- No está recomendado su implementación en cultivo extensivo.
- El almacenamiento de energía es el principal problema, por ello, este inconveniente se ha paliado con el vehículo autónomo.

21. TRABAJO FUTURO

El ser un campo reciente y que abarca muchos campos del conocimiento existe diversas líneas de trabajo, estudio y ensayo.

- Simulación 3D de fluidos del conjunto.
 - Estudio aerodinámico del vehículo
 - Estudio del deflector
 - Estudio para generación de turbulencia
 - Penetración del fluido pulverizado en medio poroso
- Simulación 2D con malla dinámica. Se puede simular el movimiento del deflector.
- Simulación mecánica del vehículo completo, incluyendo contactos en uniones
- Diseño y simulación de tren de aterrizaje UAV, resistencia a impacto.
- Optimización topológica con cargas dinámicas.
- Optimización topológica del vehículo completo.
- Simulación mecánica del chasis en la que se incluyan vibraciones y desequilibrio en la hélice.
- Diseño y fabricación de medidor de par motor de pequeñas dimensiones.
- Programación para sincronización del deflector con el vehículo.
 - Sensor ultrasonidos.
 - Infrarrojos
 - Escáner 3D
- Creación de software cuya función sea realizar todo el procesamiento previo al vuelo.
- Fabricación del vehículo y deflector con material compuesto.

- Fabricación del vehículo de tierra propuesto.
- Programación para el control del vehículo de tierra.
- UAVs con motor de combustión interna.
- Sincronización entre el vehículo de tierra y el vehículo aéreo.

22. ANEXOS

22.1. Análisis de impacto vehículo aéreo

En este documento se presenta un análisis de impacto realizado a una extremidad del vehículo. La geometría ensayada es simplificada, con el objeto de no requerir demasiada potencia de cálculo, por tanto, la conclusión de los resultados solo será válidos para conocer el orden de magnitud.

22.1.1. Materiales

22.1.1.1. Nylon 6/6 (PA) Glass Fiber

Se busca en el catálogo del fabricante el material del cual están fabricadas las extremidades de los vehículos. Para ello en las especificaciones del fabricante (DJI) indica que es Nylon 6/6 (PA) Glass Fiber. Es decir, nylon con fibra corta al 30%, las propiedades de este se encuentran son:

PERMANENCE		STANDARD
Primary Additive	30 %	
Density	1.39 g/cm ³	ISO 1183
Shrinkage, 4 mm Thickness		
Flow direction	0.25 - 0.35 %	ISO 294-4
Water Absorption, 24 hrs @ 23°C	0.80 %	ISO 62
MECHANICAL		
Impact Strength, Izod		
Notched, 4 mm thickness	4 kJ/m ²	ISO 180/1A
Unnotched, 4 mm thickness	30 kJ/m ²	ISO 180/1U
Tensile Strength	150 MPa	ISO 527
Tensile Elongation	2.0 - 2.5 %	ISO 527
Tensile Modulus	10800 MPa	ISO 527
Flexural Strength	215 MPa	ISO 178
Flexural Modulus	8700 MPa	ISO 178

Figura 162. Propiedades del Nylon 6/6 +30% Glass Fiber (company)

La curva de tensión deformación, más aproximada al material del que está realizado la encontramos al 43% de fibra. Las propiedades no difieren demasiado y para considerar el régimen plástico se puede realizar de esta forma. Si buscamos resultados más precisos hay que ensayar el material

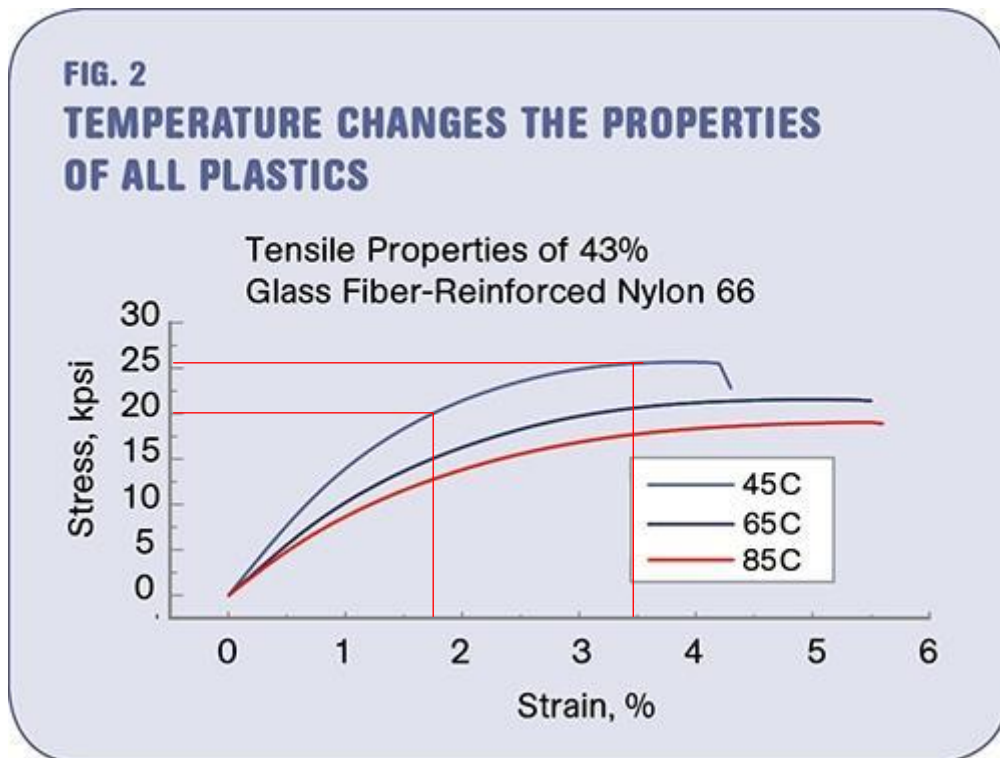


Figura 163. Curva de tensión deformación para Nylon 66 gf a distintas temperaturas. (Technology)

Como se aprecia se obtiene una tensión

de rotura de 25.1 kpsi o lo que es lo mismo 173.1 MPa, ligeramente mayor al que se obtenía con un 30% de fibra.

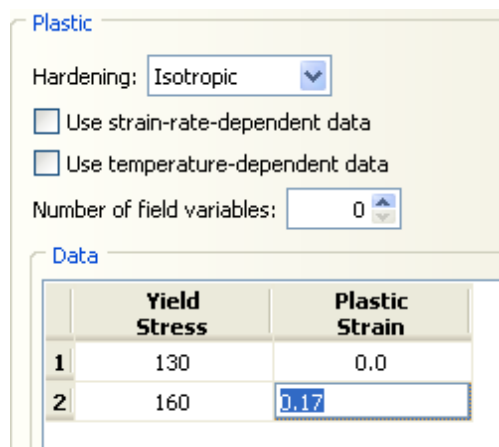


Figura 164. Curva de plasticidad. Para introducir la plasticidad no se debe olvidar que la curva de plasticidad comienza con un 0.0 de deformación, por lo que a los restantes valores se debe restar el valor del primer punto en régimen plástico.

Además, para evitar demasiadas

vibraciones durante el ensayo se le establece un damping con $\alpha = 2\%$

22.1.1.2. Asfalto/ hormigón

Se ha considerado en la simulación este material como un cuerpo rígido. Es decir, es innecesario consumir recursos computacionales en analizar el suelo cuando sabemos de antemano que no se va a ver afectado por el impacto.

Además, con esto, se asegura que la tensión máxima que aparece es en la extremidad durante el impacto, y esta tensión no se produzca en el suelo.

22.1.2. Modelo

Se modela la extremidad mediante Catia®, se consideran las dimensiones que se muestran en la Figura 165, (se crea un brazo simplificado, ya que la geometría real es compleja y se necesita mayor potencia de cálculo para trabajar con ella). Se exporta en extensión *.model a Abaqus. Posteriormente se crea un bloque en el que se simula el suelo.

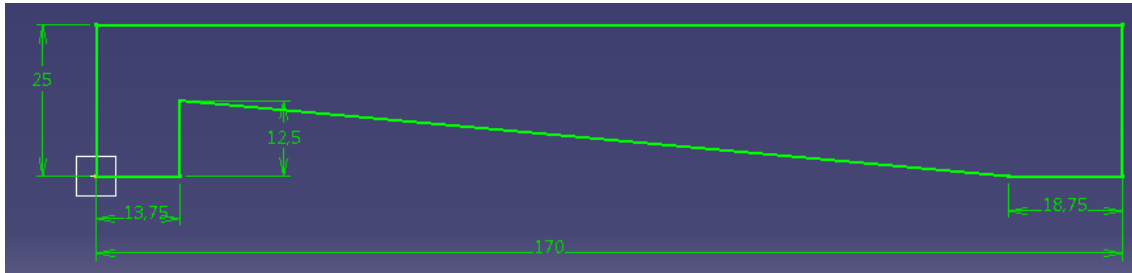


Figura 165. Dimensiones del brazo simplificado. El ancho es 20mm

La velocidad viene dada por:

$$v_f = v_0 + g \cdot t$$

$$h = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

Si suponemos que cae desde una altura de 2 m tendremos el tiempo que tarda en llegar al suelo es de 0.64 s por lo que la velocidad a la que toca el suelo es de 6.28 m/s

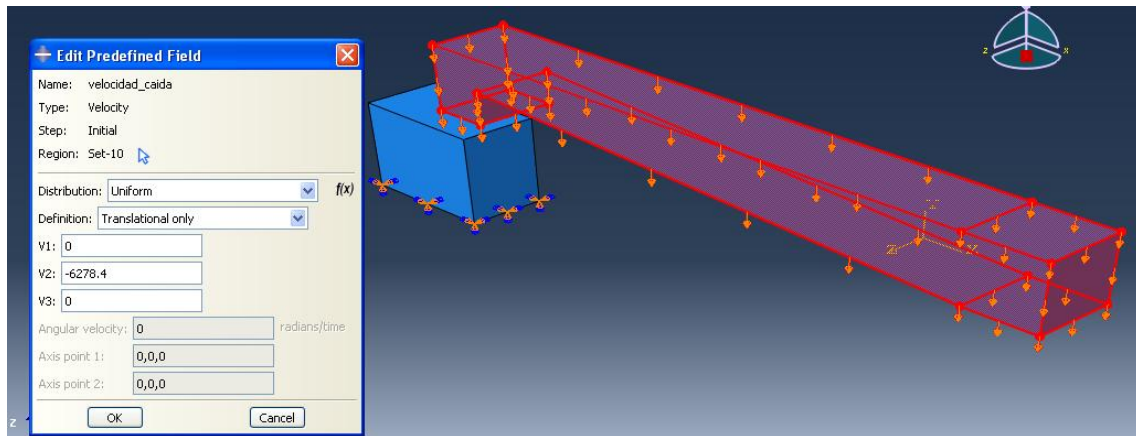


Figura 166. Velocidad de caída aplicada a todo el brazo, en las unidades adecuadas, mm/s

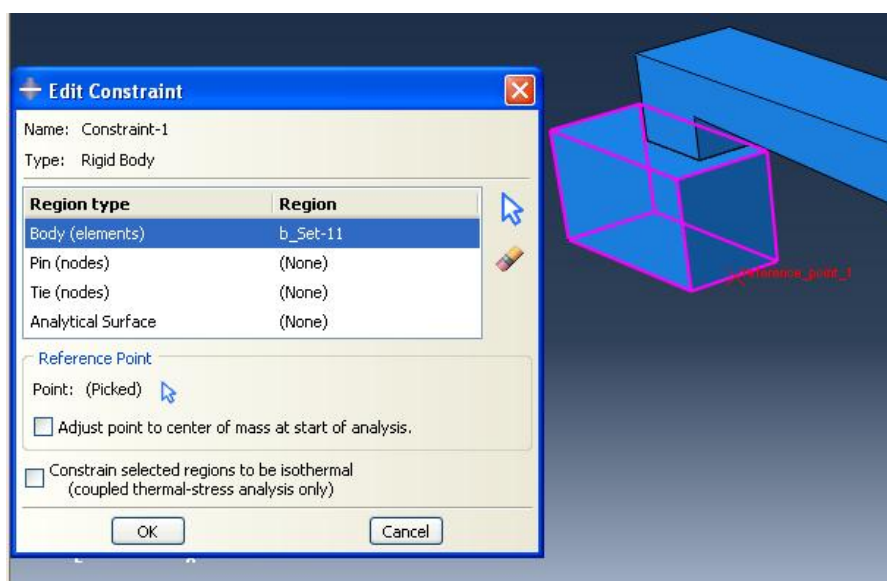


Figura 167. Se configura el suelo como un cuerpo rígido, ya que suponemos que se cae sobre asfalto u hormigón.

22.2. Resultados

Por mayor simplicidad los datos obtenidos de tensión para distintas alturas se representan en la siguiente Tabla 6:

Nº	Altura de caída (m)	Tiempo de caída (s)	Velocidad impacto (m/s)	Velocidad impacto (mm/s)	Tensión máxima V.M (MPa)
1	2	0,64	6,26	6264,18	58,46
2	4	0,90	8,86	8858,89	75,56
3	5	1,01	9,90	9904,54	90,43
4	8	1,28	12,53	12528,37	108,13
5	9	1,35	13,29	13288,34	112,89
6	10	1,43	14,01	14007,14	130,29
7	15	1,75	17,16	17155,17	131,37
8	20	2,02	19,81	19809,09	130,53
9	30	2,47	24,26	24261,08	131,69
10	40	2,86	28,01	28014,28	131,4
11	50	3,19	31,32	31320,92	131,97
12	100	4,52	44,29	44294,47	135,5
13	150	5,53	54,25	54249,42	138,14

Tabla 6. Resultados de las tensiones generadas para los distintos impactos.

Si se representan estos valores en la gráfica siguiente tendremos Figura 168:

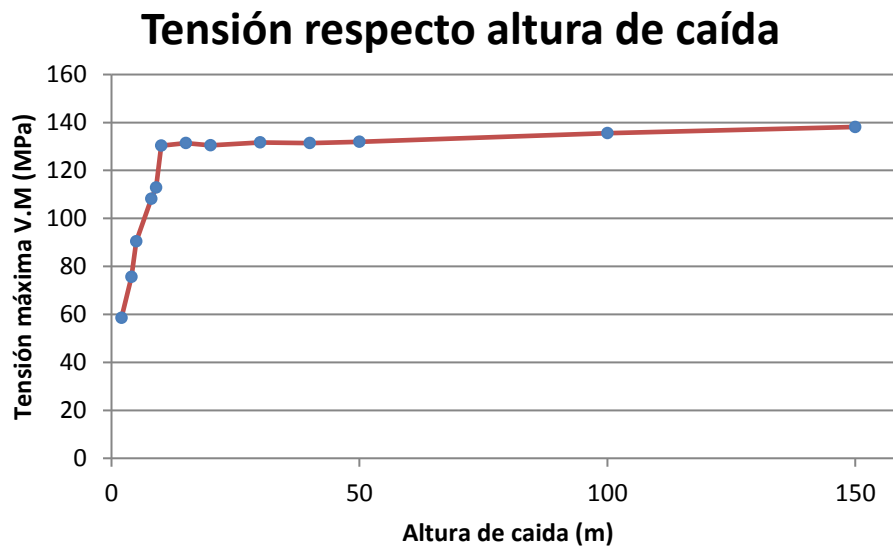


Figura 168. Tensión máxima de V. Mises para diferentes alturas de caída.

Se aprecia un comportamiento coherente, esto es debido a que el material plastifica, y apenas aumenta su tensión.

La diferencia entre una velocidad u otra radica en la cantidad de material que está a una tensión alta. Es decir, cuando incrementamos la velocidad del cuerpo aumenta también la energía de este y del impacto. Por ello, esta energía la absorbe el material estando a una tensión mayor, una mayor parte del cuerpo. Por lo que plastificaría una mayor parte del componente y se produciría la rotura. Recordar que se definió el comienzo de la plasticidad a 130 MPa, Figura 164.

Cuando exactamente se va a producir la rotura no se sabemos, ya que este depende de la cantidad de material plastifica. Esto es, la tensión máxima puede llegar en un punto concreto a 130 MPa y no producirse la rotura, depende de la tensión que tenga a su alrededor. Si llega a esta tensión la mayor parte del componente, o solo aquella zona crítica se producirá la rotura del componente. Se observa esto en las siguientes figuras:

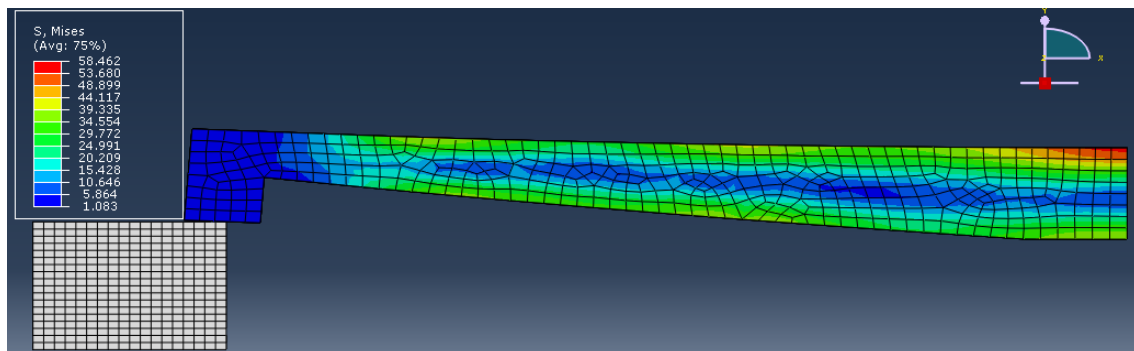


Figura 169. Tensión máxima de 58.46 MPa. Tensión correspondiente para una caída de 2m de altura. Como se aprecia no se produce fractura, todo trabaja en régimen elástico.

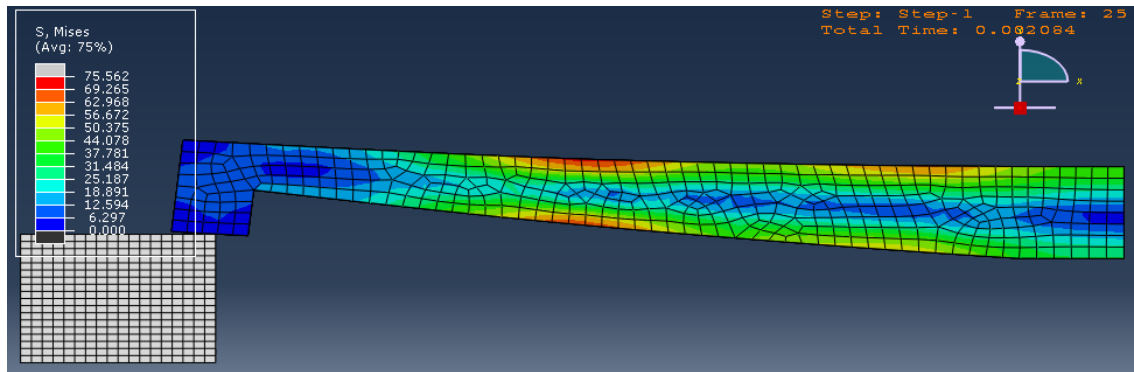


Figura 170. Tensiones para caída a 4m de altura. Aún sigue en régimen elástico y no se produce rotura.

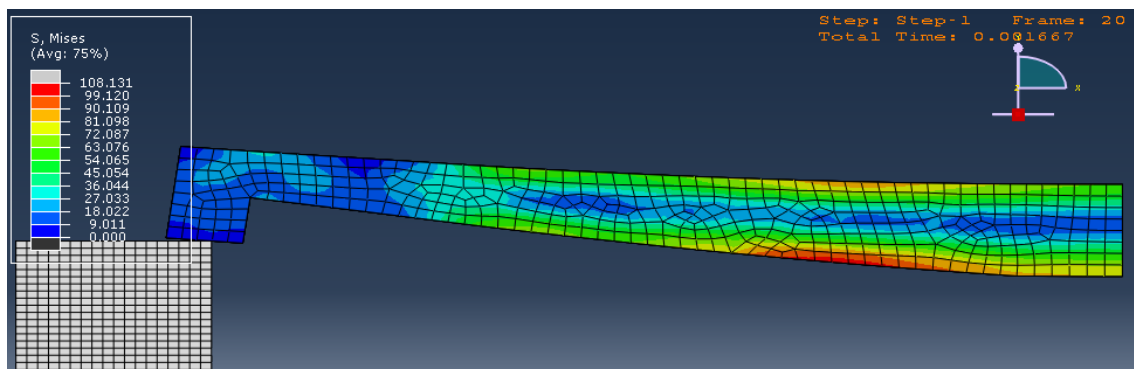


Figura 171. Tensiones para una caída de 8m de altura

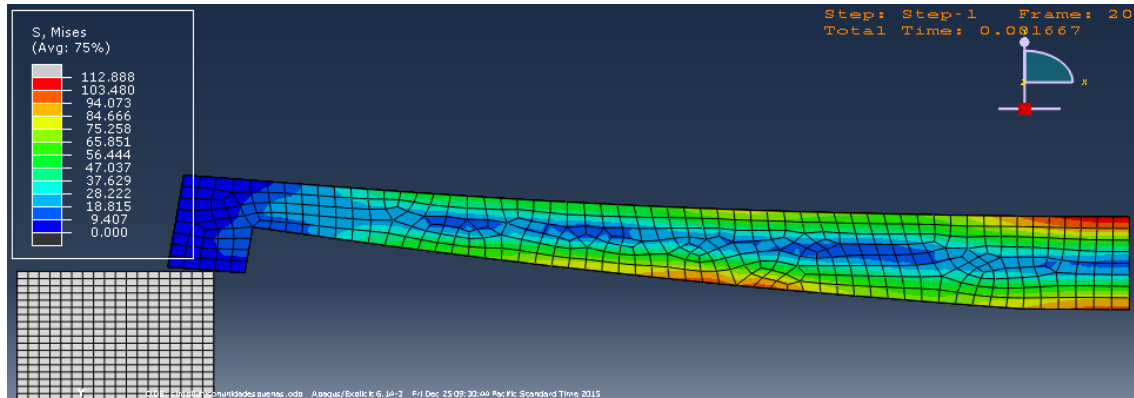


Figura 172. Tensión para 9m de altura. Sigue sin producirse la fractura.

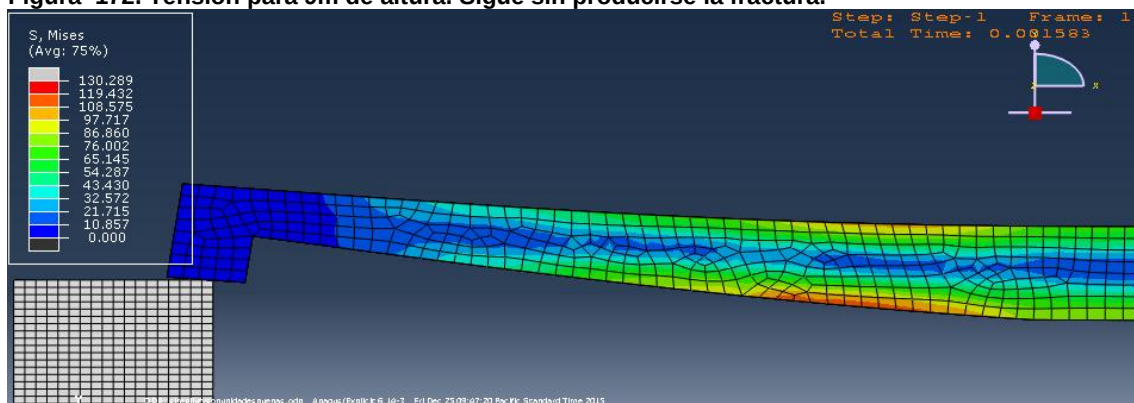


Figura 173. Tensión para 10m de altura. Ya se ha conseguido la tensión de plasticidad, pero como se aprecia la zona es mínima, por lo que casi seguro que no se produce rotura.

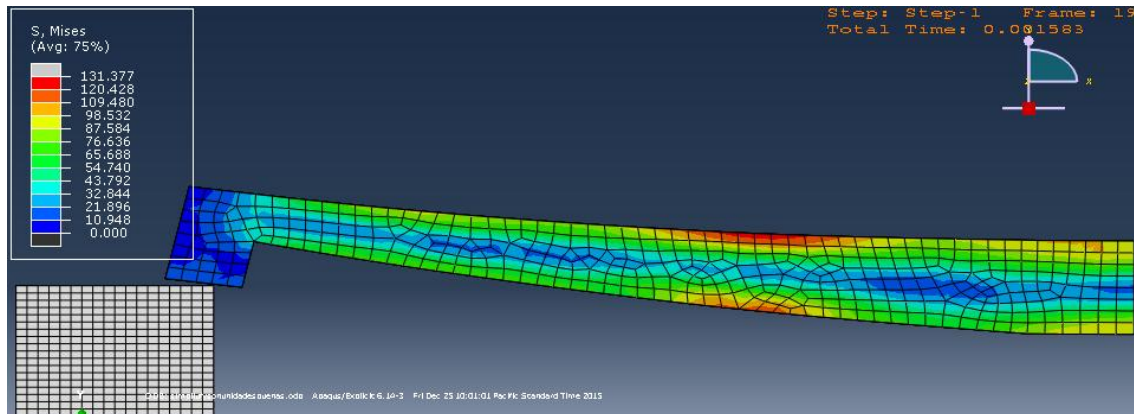


Figura 174. Tensión para unos 15m de altura. Hay un mayor volumen con zona en plasticidad. Ya si puede producirse la rotura.

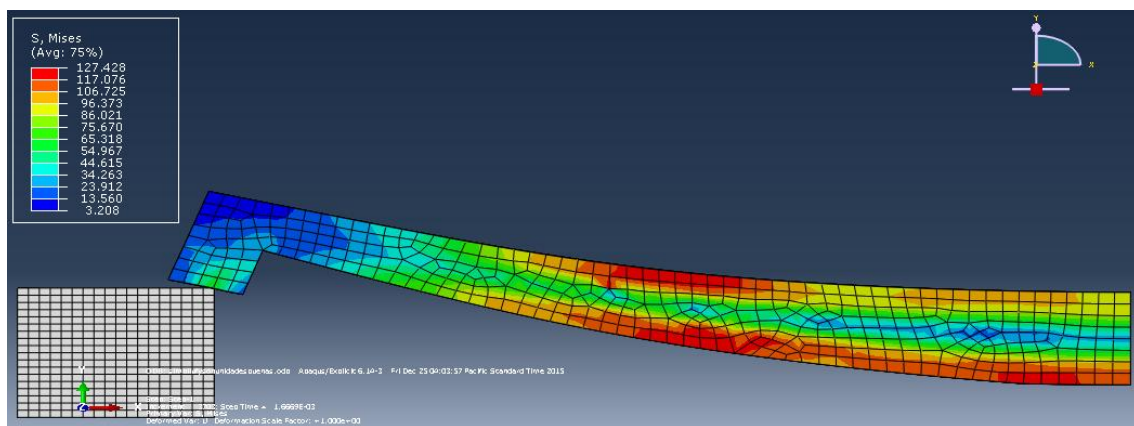


Figura 175. Tensión para una altura de 50m

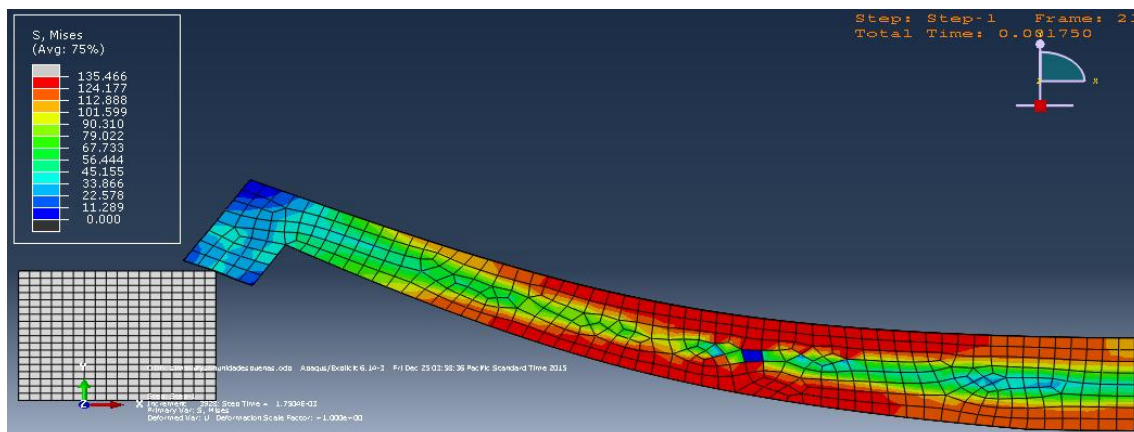


Figura 176. Tensión para caída de 100m. Se aprecia como hay mucho más material a alta tensión.

Para los primeros casos analizados, es más compleja determinar la distribución de tensiones, ya que se produce una vibración que hace variar la distribución de tensiones. A una mayor velocidad si es más fácil capturar la distribución de tensiones ya que es mucho mayor comparado con la vibración que se produce.

22.3. Boquilla de pulverización

La boquilla a utilizar debe de ser pequeña y liviana. Para ello se busca en el catálogo de boquillas que se emplean en las mochilas de pulverizadores manuales, las cuales son las que más se aproximan a nuestros requerimientos.

En concreto se utiliza una ALBUZ de la serie ATR. Una boquilla con soporte plástico y núcleo de material cerámico. Estas, según asegura el fabricante proporciona una mayor durabilidad en el tiempo y una nula corrosión ante fluidos fitosanitarios. En cuanto a la distancia de aplicación el fabricante recomienda desde unos 50 cm hasta unos 90 cm, por lo que está en el rango de nuestra aplicación. Además, el ángulo de pulverización podrá variar entre 80 y 110°. Como es normal, dependiendo de la presión a la que suministremos el fluido circulará un mayor o menor caudal. Esto se muestra en la Figura 177:

bar	 G 1348  G 1349  G 1350  G 1351 l/mn  G 1352  G 1353  G 1354									
	WHITE	LILAC	BROWN	YELLOW	ORANGE	RED	GREY	GREEN	BLACK	BLUE
5	0,27	0,36	0,48	0,73	0,99	1,38	1,50	1,78	2,00	2,45
6	0,29	0,39	0,52	0,80	1,08	1,51	1,63	1,94	2,18	2,67
7	0,32	0,42	0,56	0,86	1,17	1,62	1,76	2,09	2,35	2,87
8	0,34	0,45	0,60	0,92	1,24	1,73	1,87	2,22	2,50	3,06
9	0,36	0,48	0,64	0,97	1,32	1,83	1,98	2,35	2,64	3,24
10	0,38	0,50	0,67	1,03	1,39	1,92	2,08	2,47	2,78	3,40

Figura 177. Caudales para distintas presiones

Por lo que, si se aplica el fluido fitosanitario a una presión, de 5 bares tendremos un caudal de 0.27 l/min. Si dimensionamos el depósito de tierra para 6 horas de funcionamiento, que será lo que pueda estar encendido el generador, necesitaremos un depósito con capacidad de 97.2 litros.

22.3.1. Portaboquilla utilizado

Para soportar la boquilla anterior se requiere de un portaboquilla, ya que el portaboquilla original es demasiado voluminoso y pesado. Por ello se diseña como se muestra en la siguiente imagen (se emplean tornillos métrica 2 y longitud 12 mm):

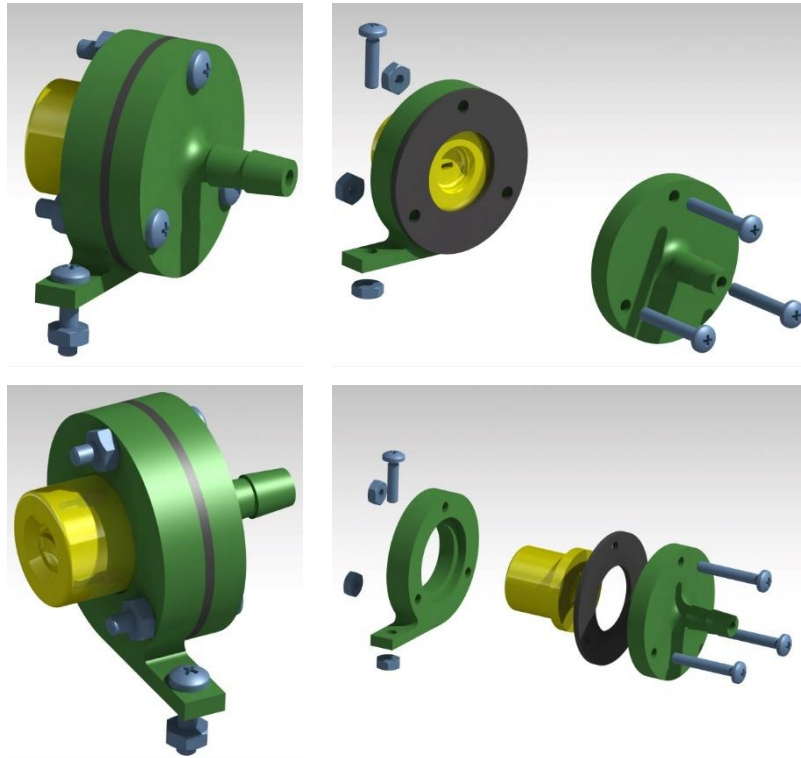


Figura 178. Distintas perspectivas y ensamblaje del conjunto.

Como se aprecia todos los componentes se pueden imprimir sin recurrir a material de soporte. Una vez fabricado y montado en el resto del conjunto queda como se muestra en Figura 179:

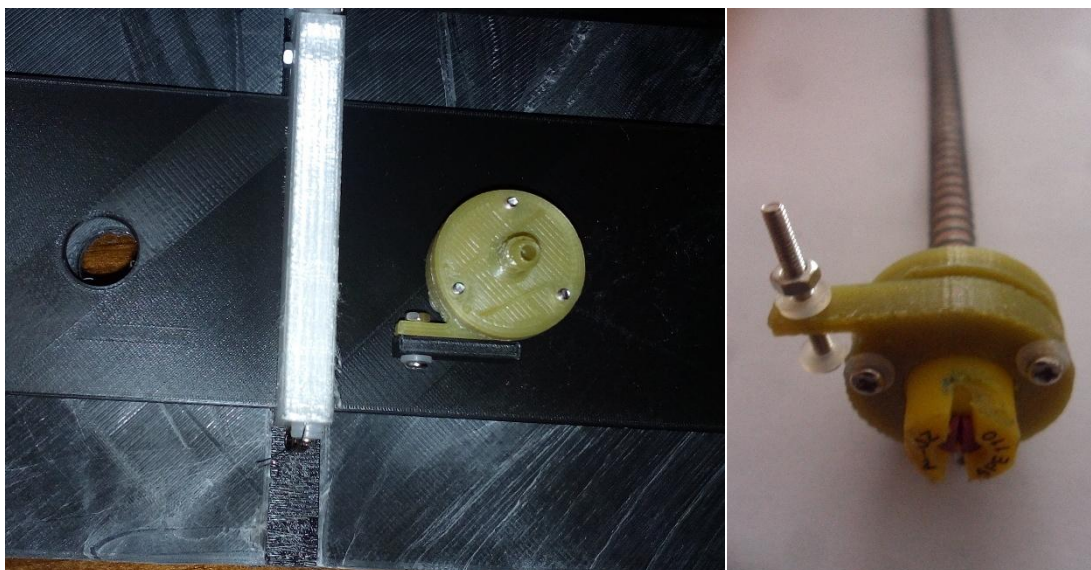


Figura 179. Montaje de la boquilla en deflector.

22.4. Banco de ensayo de motores eléctricos de aeromodelismo

Para verificar algunos de los cálculos realizados y tener las variables de entrada en las simulaciones de elementos finitos, se realiza el diseño, fabricación de un banco de ensayo para motores de aeromodelismo, donde en lugar de utilizar un freno hidráulico o mecánico, la carga resistente será la hélice. De esta forma es mucho más sencilla caracterizar el conjunto, ya que caracterizar independientemente la hélice es más complicada. Por lo tanto, se determinará el motor para la hélice utilizada (12 x 4.5 inch), que será la que se emplea en todos los cálculos de este documento.

Por lo tanto, se comienza con el diseño del conjunto, para fabricarlo mediante FDM, además se necesitará una báscula para la medición del empuje.

Los parámetros principales para el diseño de ella han sido:

- Disposición horizontal de la turbina, con el objetivo de no generar interferencia con el aire aspirado o expulsado por esta.
- Minimizar del rozamiento en el sistema mecánico.
- Fabricable mediante prototipado rápido evitando utilizar material de soporte.
- Intercambiable y adaptable a distintos conjunto motor-hélice, turbina y distintas básculas.

Para ello la fuerza de empuje horizontal se convierte en horizontal con la biela, con eje de 8 mm apoyado sobre dos rodamientos 608zz. Para el correcto alojamiento de los rodamientos se tendrán en cuenta su ancho (7 mm) así como su diámetro (22 mm), para un alojamiento de diámetro 22.5 mm ya que hay que tener en cuenta la tolerancia de fabricación, viéndose disminuido de diámetro al fabricarse.

Por otro lado, las dimensiones en ambos extremos de la biela se han realizado con relación 1:1, siendo el valor obtenido directamente en la báscula el empuje del motor. Además, se ha puesto un separador del conjunto, de forma que la fuerza ejercida sobre la báscula sea perpendicular a esta, pudiendo intercambiarse por otros separadores de distintas dimensiones si la báscula tuviera otra altura.

En el extremo de la biela, el cual está en contacto con la báscula, se ha intentado hacer de las menores dimensiones posibles, para no falsear el valor obtenido y que la longitud

al eje de rotación constante, esto es, debe de tener un espesor para poderse fabricar, pero el apoyo con la báscula no excede de los 0.4 mm.

A continuación, se muestran imágenes del dispositivo:



Figura 180. Distintas vistas del dispositivo.

Posteriormente se procede a la fabricación, los parámetros empleados en la fabricación de los componentes han sido:

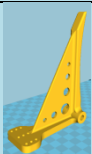
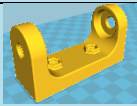
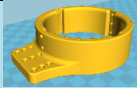
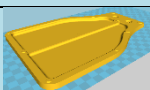
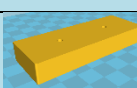
Prusa i2										
Pieza	Tiempo de impresión (min)	Layer height (mm)	Fill Density (%)	Bottom/Top thickness (mm)	Nozzle temperature (°C)	Bed temperature (°C)	Nozzle size (mm)	Material de soporte	Brim (líneas)	Costo (€)
	6h 21'	0.2	60	1.2	215	40	0.4	No	No	1.02
	5h 29'	0.2	60	1.2	215	30	0.4	No	No	0.84
	9h 15'	0.2	60	1.2	215	30	0.4	No	No	1.27
	13h 12'	0.3	40	1.2	215	40	0.4	No	No	2.77
	2h 6'	0.3	40	1.2	215	40	0.4	No	No	0.48

Tabla 7. Parámetros de impresión

El conjunto, para ensamblarlo, requiere además de dos rodamientos 608zz, varilla roscada de M8x100 mm, y cuatro tuercas M8 con 8 arandelas para varilla M8. Además de dos tornillos M4x35mm con dos tuercas M4, tres tornillos M3x10mm para sujetar la tobera, así como un tornillo M2x6 de seguridad para prevenir accidentes. Otros tres tornillos M3x25 con sus tuercas y arandelas para sujetar la tobera en el acople de la biela.

Finalmente, en su ensamble se tiene el dispositivo como se muestra.



Figura 181. Distintas perspectivas del dispositivo.

Para realizar el ensayo de forma segura se realizó en el banco de ensayo, adjunto en anexo.

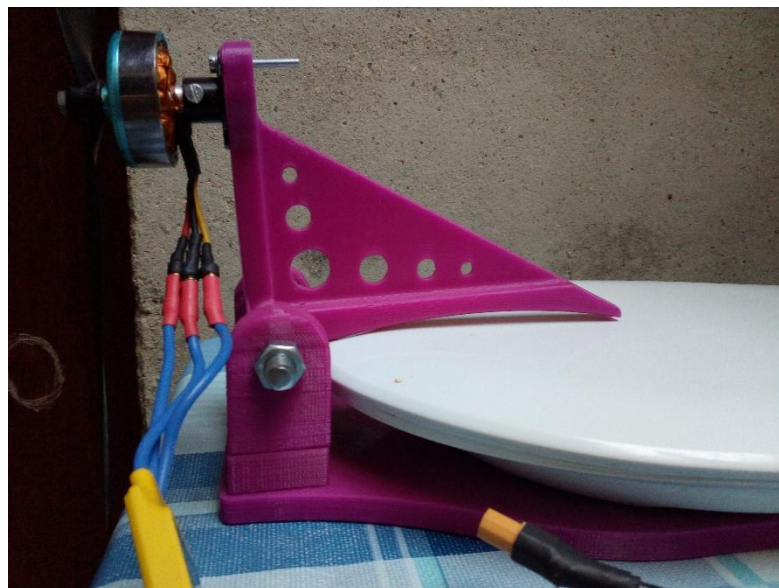


Figura 182. Ensayo del motor. Se utiliza una báscula y se requiere realizar momentos para obtener el empuje. Se puede medir velocidad de la estela, empuje, revoluciones y temperatura del motor.

22.5. Patentes relacionadas

Largely autonomous flying UAV helicopter drone for the application of pesticides in agriculture, forestry and viticulture (Up to a maximum take-off weight of 150kg) DE202014002338U1,

DE201420002338 Volker Jung. Se presenta el segundo caso mencionado de vehículo aéreo con ala móvil, donde se establece una distribución

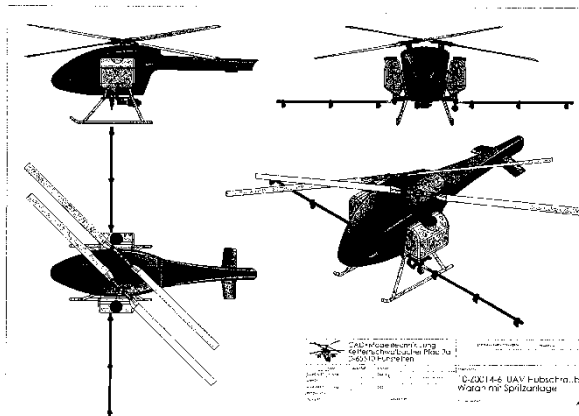


Figura 183. Patente DE202014002338U1

convencional de las boquillas, útil para grandes extensiones de cultivo en horizontal. Presentando la problemática de que los UAV de ala rotatoria se comportan mejor en pequeñas extensiones de cultivo, ya que tienen menor autonomía y su principal ventaja es la maniobrabilidad. Para grandes extensiones de cultivo conviene la utilización de vehículos de ala fija.

Pesticide spraying unmanned aerial vehicle capable of precisely spraying pesticides. CN103719062A. Se establece un sistema de aplicación de fitosanitarios mediante sensores GPS para aplicar en la zona necesaria, pero no establece como se dirige ni orienta el producto fitosanitario. Es decir, se basa en la estructura de programación para aplicar fitosanitario en la zona correspondiente, para ello utiliza electroválvulas, GPS y un microprocesador.

Soft liquid pesticide box. CN203661863U se diseña un depósito para el almacenamiento de fitosanitarios, pero la aplicación del fitosanitario es similar a la patente DE202014002338U1. Es decir, solo avanza en la forma de llenado de este depósito de fitosanitarios.

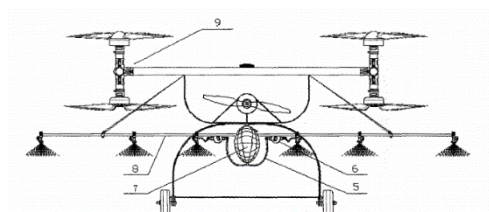


Figura 184. Patente CN203661863U.

Aerial vehicle for agriculture and forestry CN104554726A. Se dispone de un brazo telescópico que soporta la boquilla. Teniendo los mismos problemas de no direccionalidad del producto, ya que si esta se sitúa bajo el vehículo se desviará por la trayectoria seguida por el aire y se sitúa fuera de la estela de aire de este no se producirá una atomización ni un avance adecuado del producto.

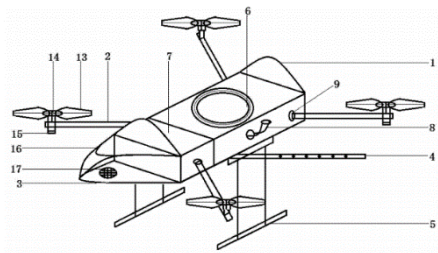


Figura 185. Invenção CN104554726A

Unmanned helicopter spraying device capable of more accurately controlling spraying area CN202244085U. Se implementa la misma disposición de boquillas, pero controladas de forma independiente, siendo algo más preciso, pero quedando direccionado por la estela del viento del vehículo.

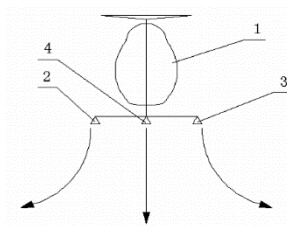


Figura 186. CN202244085U.

Two-vehicle wide pesticide spraying unmanned aerial vehicle (UAV) CN202953174U. Se utilizan dos vehículos aéreos. Donde las boquillas se unen mediante una barra, lo mismo que se implementa en las anteriores referencias, pero utilizando dos UAV.

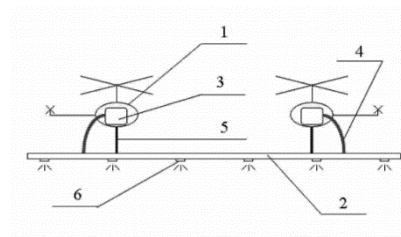


Figura 187. CN202953174U

Agricultural unmanned machine CN203921199U. Se repite la misma disposición. Se implementan las boquillas a lo largo de dos extremidades del dron, presenta los mismos problemas que todos los anteriores.

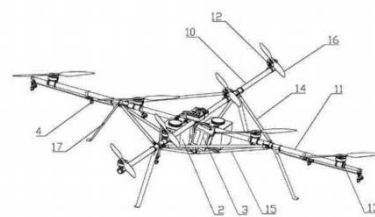


Figura 188. CN203921199U

A UAV for pesticide spraying CN204949242U. En las boquillas se muestra una disposición similar. Dispone del tanque on-board y su correspondiente bomba para aumentar la presión, todo ello controlado con un

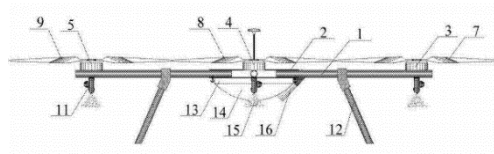


Figura 189. A UAV for pesticide spraying CN204949242U

microcontrolador. El producto fitosanitario se aplica de la misma forma que en el resto de invenciones.

Method of adjusting plant protection spraying system of single-rotor agricultural unmanned aerial vehicle CN104699117A. Estudia lo que se quiere evitar con la invención presentada, esto es, estudia el ángulo óptimo para una mayor superficie

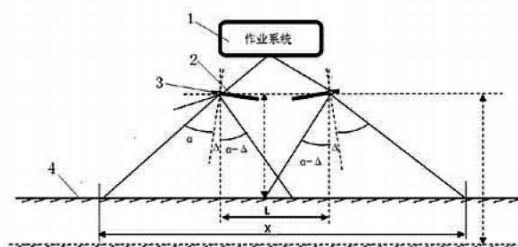


Figura 190. CN104699117A

pulverizada, no pudiendo adaptarse para masas arbóreas verticales. Esto será útil cuando se trate de aplicar fitosanitario en grandes extensiones, presentando otros inconvenientes, ya que para grandes superficies es más conveniente utilizar UAV de ala fija, ya que son capaces de cubrir mucha más superficie, en menor tiempo con una mayor autonomía.

Spray head withdrawing/stretching device of agricultural unmanned plane for plant protection CN204236779U.

Patenta un sistema rotatorio de boquillas. Teóricamente presenta la ventaja de variar el ángulo de la boquilla, por tanto, direccionando el fluido fitosanitario en la orientación adecuada. Por otro lado, tiene la problemática de que el flujo de aire no se direcciona, y aunque se pulverice en una dirección el fluido pulverizado será arrastrado por el flujo de aire, por lo que no se consigue el objetivo de direccionar el fluido, que este sea atomizado y no se genere la turbulencia necesaria para aplicar de forma homogénea el producto fitosanitario. Es decir, por un lado, si el brazo rotatorio donde se une la boquilla es largo no se conseguirá penetración en el cultivo, no se aprovecha el aire generado por el vehículo y no se genera la turbulencia necesaria. Si dicho brazo rotatorio es corto, el fluido fitosanitario será arrastrado de forma vertical debido al flujo de aire generado por el vehículo. Por lo tanto, en este último caso estaríamos ante la misma problemática que presentan todas las invenciones.

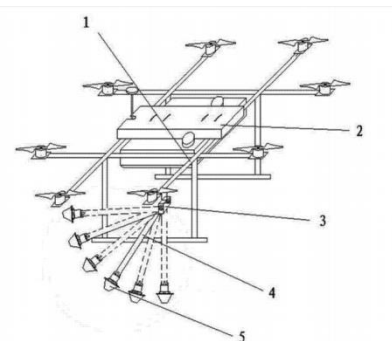


Figura 191. CN204236779U

22.6. PROGRAMAS ARDUINO

Lectura señal de PWM en receptor de la emisora principal

// Programa base para leer una señal dada por el receptor de vehículo para su utilización en el movimiento del deflector tipo II. La salida nos la muestra en el Monitor Serie y hacemos girar un servo en la patilla 13. Se trata de la versión base del programa, ya que no implementa movimiento oscilatorio.

int entrada = 7; // pin en el que meternos la señal que viene del receptor

int salida = 13;

unsigned long pulso; // variable en la que almacenaremos la lectura

void setup()

{

pinMode(entrada, INPUT); // configuramos el pin de lectura como entrada

pinMode(salida, OUTPUT);

Serial.begin(9600); // habilitamos puerto serie

}

void loop()

{

pulso = pulseIn(entrada, HIGH); // leemos el pulso

Serial.println(pulso); // mandamos el dato al monitor serie

delay(500); // pausa para no volver loco al monitor serie

while (pulso >= 1800){

analogWrite(13, 255);

delay(2000);

analogWrite(13, 0);

delay(1000);

pulso = pulseIn(entrada, HIGH);

}

analogWrite(13, 0);

}

22.7. OPTIMIZACIÓN DE LA TRAYECTORIA

Se proponen varias trayectorias a seguir por el vehículo en el caso de que el cultivo sea olivar, o plantación similar, con 4 m de diámetro. Se considera una distancia para aplicación de fitosanitarios de 100 cm (distancia válida por la boquilla empleada). Para estudiar la diferencia entre ellas se proponen varias trayectorias, y de medirá la longitud de la trayectoria seguida por el vehículo, ya que minimizar esta es importante. Solo será válido para la distribución considerada, siendo improbable que el agricultor encuentre esta distribución en su parcela, pero servirá como orientación o guía para la programación de la trayectoria.

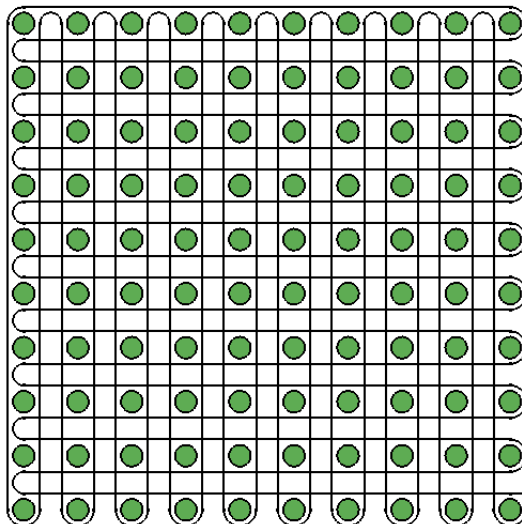


Figura 192. Distribución rectangular para marcado de 10x10

Longitud recorrida de 3904.152 m, aplicando fitosanitario en la mayor parte de las plantaciones solo por 4 lados. Esta distribución no será adecuada.

En la trayectoria siguiente se tiene una longitud de 2860.13 m, con la ventaja de aplicar fitosanitario alrededor de toda la plantación.

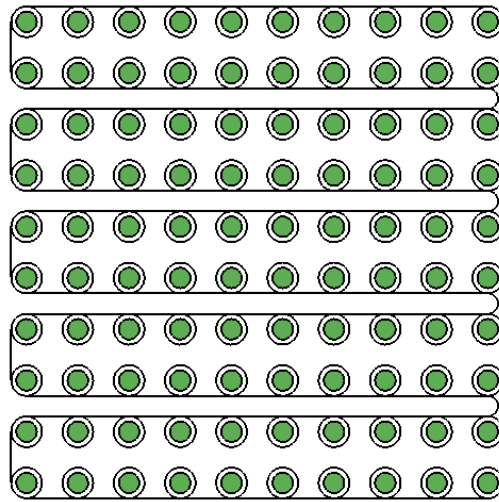


Figura 193. Distribución circular para maqueo de 10x10

Por lo que la mejor trayectoria a seguir es la correspondiente a la Figura 193.

Las trayectorias anteriores si se aplican a otro tipo de cultivo, como las plantaciones de tomates será más ventajoso, ya que la trayectoria seguida por el vehículo será mucho menor.

22.8. MANUAL DE USUARIO.

La intención de este documento es justificar uno de los objetivos del presente TFG, la utilización futura por parte de usuarios, los cuales no dispongan de un nivel alto de cualificación, además de prevenir errores y poder realizar así un uso correcto del conjunto.

Una vez que tenemos todos los dispositivos preparados para su uso, quedará revisar que no existe ninguna degradación en ningún componente, así como elementos que puedan ser causa de incidentes o en el peor de los casos, accidentes.

22.8.1. Carga de baterías

Un buen uso comienza desde la carga de las baterías, esta se debe realizar de forma controlada y en contenedores ignífugos y alejada de elementos inflamables. Con ello nos referimos a no sobrepasar la velocidad de carga de estas, que como se indicó más arriba viene dada por la capacidad de esta, multiplicada por las C de descarga, que usualmente suele ser 1. Si desconocemos este valor considerar que como máximo se puede cargar a 1C, aunque siempre se recomienda cargarlas a menor velocidad. Una vez cargadas se recomienda verificar el nivel de voltaje de estas con el dispositivo preparado para ello, ya que se deben evitar realizar cortocircuitos con otros elementos de medida.



Figura 194. Bolsa de protección ignífuga para carga de baterías.

22.8.2. Controles principales

Ya se vieron los movimientos del vehículo, la siguiente imagen ilustra el movimiento de los stick para realizar los 4 movimientos básicos del vehículo.

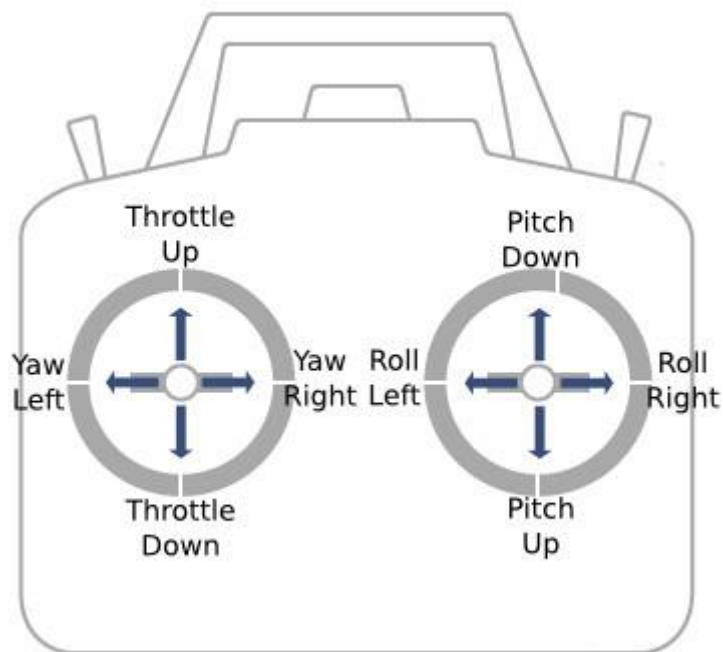


Figura 195. Anatomía de todos controles de 4 canales en Modo II.

22.8.3. Stick izquierdo

Accionando el movimiento horizontal, el vehículo girará sobre su propio eje. El sentido en el que ejecute el movimiento dependerá de las preferencias del piloto y del modo de vuelo. Si tenemos capacidad de realizar vuelo en primera persona al accionar el stick a la derecha el vehículo girará en sentido horario si lo miramos desde arriba, si volamos con contacto directo mejor invertir el sentido respecto al anterior.

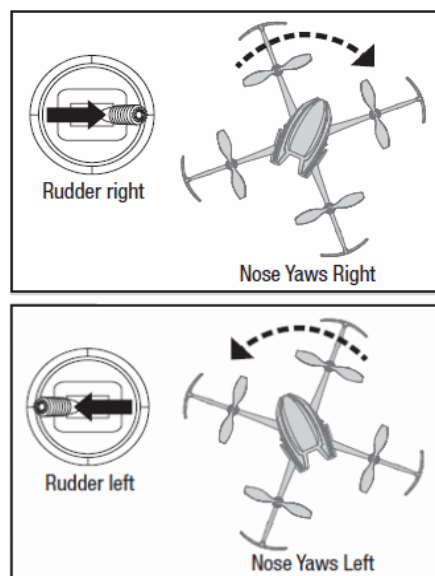


Figura 196. Yaw.

Si accionamos el stick hacia arriba le daremos más potencia a todos los motores, por lo que el vehículo ascenderá. Con la configuración utilizada el vehículo ascenderá si el stick se sitúa a una cantidad mayor al 50%, y descenderá en caso contrario. Además, es de destacar que la posición de reposo es

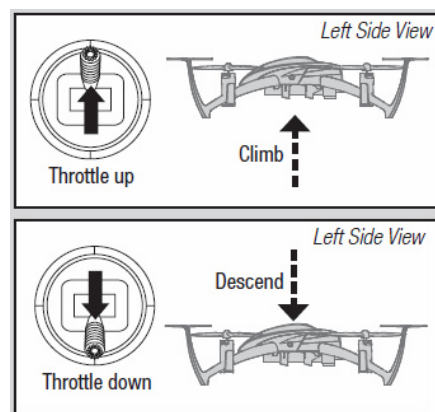


Figura 197. Throttle

a un 50%, por lo que sí está correctamente configurado, y no accionamos ningún control, el vehículo permanece estacionario.

22.8.4. Stick derecho

En este stick se tienen los controles para realizar movimiento en el plano, estos son roll y pitch

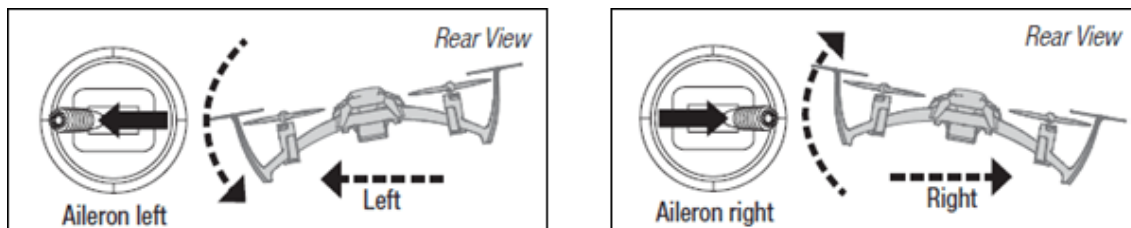


Figura 198. Movimiento de roll.

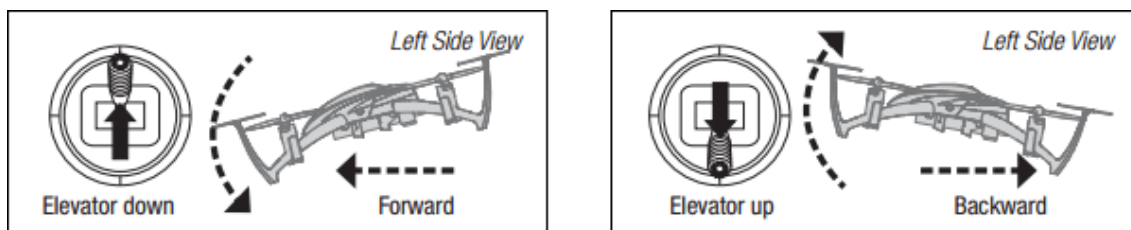


Figura 199. Movimiento de pitch.

Antes de realizar el vuelo es recomendable realizar la calibración del sensor magnético, ya que varía la orientación del campo magnético, dependiendo de la posición en la que nos situemos en el globo terráqueo. Esta calibración se realiza de la siguiente forma:

- Accionamos de forma consecutiva el stick de los tipos de modo de vuelo, un número mayor a veces,
- El vehículo entrará en modo calibración de dicho sensor, nos avisará mediante el emisor lumínico que permanecerá en naranja.
- Tomamos el dron de forma que la parte delantera del vehículo se oriente de forma vertical ascendente.
- rotamos 360°
- situamos el dron de forma horizontal con la parte delantera hacia delante
- rotamos 360° y finaliza la calibración, se nos avisará mediante la señal lumínica, pasará a ser verde. Se deja el vehículo en la posición de despegue horizontal.

Una vez realizado esto tan solo tenemos que situar el vehículo en una zona de despegue segura, alejarnos y realizar el vuelo.

22.9. MANUAL DE OPERACIONES

La forma de proceder para la aplicación de fitosanitarios es:

22.9.1. Previos al vuelo

- Planificación de la operación. Se marcará el lugar de trabajo, además de las trayectorias seguidas por el vehículo y movimientos del deflector.
- Carga baterías.
- Chequeo de materiales en buen estado
- Chequeo de hélices correctamente apretadas
- Chequeo del correcto funcionamiento del deflector
- Revisión del estado de los sensores

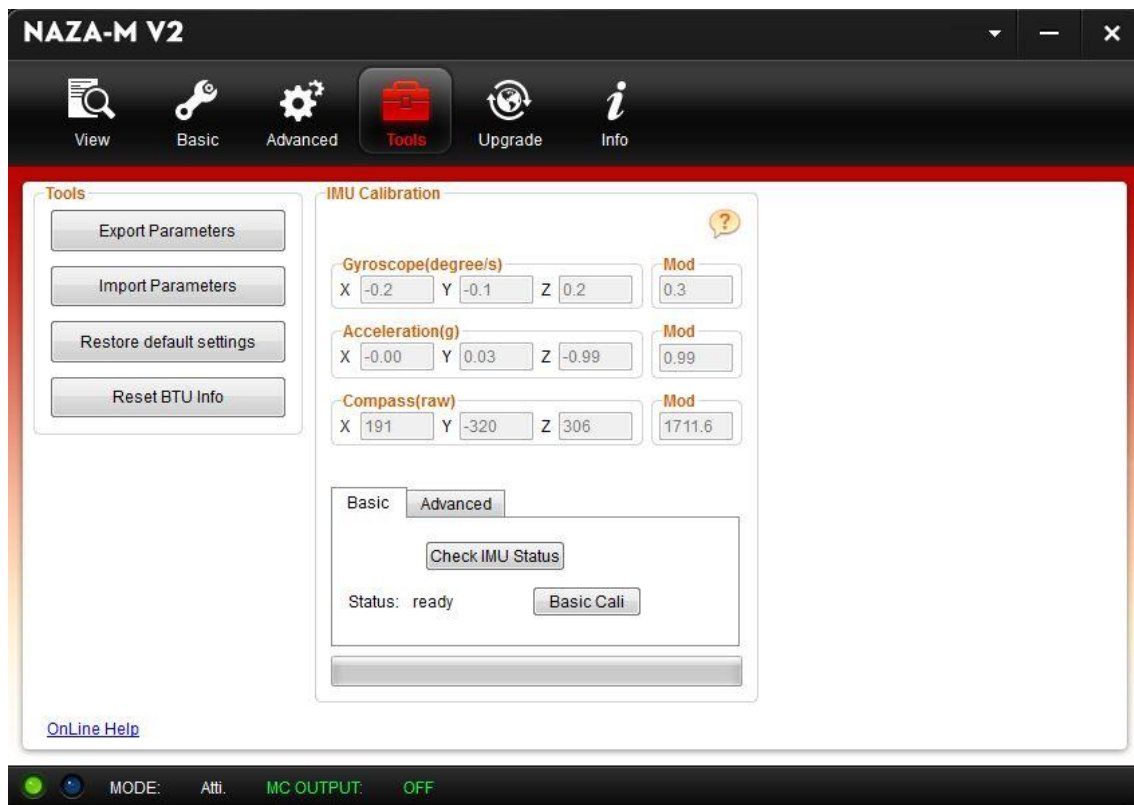


Figura 200. Indica los valores de los sensores. Si el dron esta estacionario el giróscopo y acelerómetro debe de marcar 0. El compás dependerá de la orientación del vehículo.

22.9.2. Preparación del vuelo

El siguiente paso ya se realizará en la zona de trabajo. Se realizará el montaje de la estación de tierra, es decir el montaje de la pantalla LCD, antenas y baterías. Se sujetarán correctamente las baterías en el vehículo, se verificará de nuevo el nivel de carga de todas las baterías destacando, por su importancia, la emisora. Si sus niveles son adecuados se procederá al encendido de los dispositivos, siendo el primero en encenderse el vehículo, posteriormente los sistemas auxiliares como la transmisión de video y finalmente la emisora. Ello puede ayudar a prevenir accidentes por lo que se explica posteriormente.

- Calibración de magnetómetro.
 - o En el lugar a realizar el vuelo el operario debe coger el vehículo, con la flecha que dispone el GPS apuntando hacia arriba, sin soltarlo debe de girar sobre sí mismo 360°, posteriormente debe ponerlo horizontal y repetir el mismo movimiento. La luz debe estar en verde.



- Se debe de tener una zona de despegue segura. Esta no debe de superar un 10%.
- Preparación de la estación de control. El operario deberá instalar los medios que disponga, bien sea Smartphone, Tablet o pc.

22.9.3. Comienzo del vuelo

- El vuelo comenzará al chequear que los sensores miden correctamente, y se tiene buena comunicación con los satélites. El número de satélites mínimo es de 6.
- Para el armado del vehículo se debe realizar la siguiente combinación de stick que se muestra en la imagen

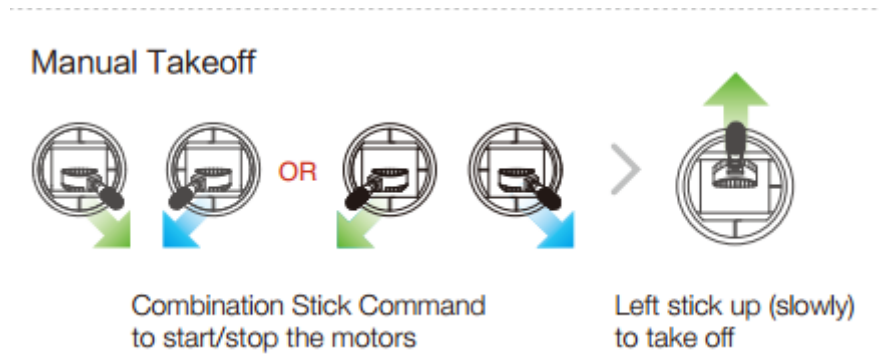


Figura 201. Combinaciones de stick posibles para el armado del vehículo.

22.9.4. Durante el vuelo

- El operario durante los primeros vuelos debe supervisar que se esté realizando correctamente la operación.
- En caso de aborto de misión debe accionar el stick..... del control, retomando el piloto el control.
- Se puede realizar de forma manual el control del deflector. Se empleará en determinadas situaciones, en las que se tenga una distribución de la plantación de forma vertical puede permanecer fijo, y en determinado caso accionarlo de forma manual.

20.8.5 Finalización del vuelo

Siempre que se realice el apagado de la emisora se recomienda realizar el apagado del vehículo antes de volver a realizar el encendido de esta, ya que si el vehículo esta ‘armado’ o preparado para el vuelo al encender la emisora, esta realiza un chequeo automático de los controles y se accionen de forma automática, creando una situación de peligro.

22.10. Terminología

OACI Organización de Aviación Civil Internacional

UAV Unmanned Aerial Vehicle

RPAS Remotely Piloted Aircraft

UAV Uninhabited Aerial Vehicle

UAS Unmanned Aerial System

RPV Remotely Piloted Vehicle

RPA Remotely Piloted Aircraft

ROAV Remotely Operated Air Vehicles

MAV Micro Aerial Vehicle

VTOL Vertical Takeoff and Landing

GCS Ground Control Station

RPS Remotely Pilot Station

LOS line of sight

BVLOS Beyond Visual Line Of Sight

MTOM (Message Transmission Optimization Mechanism)

FOV Field Of View

TVL Television Lines

23. PRESUPUESTO

23.1. Precios unitarios

Chasis

		unidad
0101	Extremidad F450	pieza
Precio unitario	4,59	€
CUATRO EUROS CON CINCUENTA Y NUEVE CÉNTIMOS		
		unidad
0102	Tren de aterrizaje	pieza
Precio unitario	3,03	€
TRES EUROS CON TRES CÉNTIMOS		
		unidad
0103	Tornillo acero M 2.5 x 6 mm	pieza
Precio unitario	0,1	€
CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS		
		unidad
0104	Tornillo M 3 x 6 mm	pieza
Precio unitario	0,1	€
CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS		
		unidad
0105	Arandela M 2.5	pieza
Precio unitario	0,05	€
CERO EUROS CON CINCO CÉNTIMOS		
		unidad
0106	Arandela M 3	pieza
Precio unitario	0,05	€

CERO EUROS CON CINCO CÉNTIMOS

		unidad
0107 Tuerca autoblocante M 2.5		pieza
Precio unitario	0,1	€

CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS

		unidad
0108 Tuerca autoblocante M 3		pieza
Precio unitario	0,1	€

CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS

		unidad
0109 Hélice fibra de carbono Slow Fly 12x3.8"		pieza
Precio unitario	4,38	€

CUATRO EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS

		unidad
0110 Tuerca M4		pieza
Precio unitario	0,05	€

CERO EUROS CON CINCO CÉNTIMOS

		unidad
0111 Arandela M4		pieza
Precio unitario	0,05	€

CERO EUROS CON CINCO CÉNTIMOS

		unidad
0112 Brida		pieza
Precio unitario	0,1	€

CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS

		unidad
0113 Cinta adhesiva elastómero acrílico 5mm VHB 4910		m.l
Precio unitario	2,33	€

DOS EUROS CON TREINTA Y TRES CÉNTIMOS

Instalación de alta intensidad

		unidad
0201	Variador de velocidad, ESC 25 A	pieza
Precio unitario	10,6	€

		unidad
0202	Motor Brushless outrunner 240 W	pieza
Precio unitario	10,96	€

		unidad
0203	Conector individual, macho - hembra tipo banana ϕ 2mm	pieza
Precio unitario	0,121	€

		unidad
0204	Conector hembra XT-60	pieza
Precio unitario	1,41	€

UN EUROS CON CUARENTA Y UN CÉNTIMOS

		unidad
0205	Conector banana ϕ 4 mm	pieza
Precio unitario	4,5	€

CUATRO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

		unidad
0206	Cable de silicona 10 AWG	m.l
Precio unitario	4,39	€

CUATRO EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS

unidad

0207 Termo retráctil ϕ 8 mm	m.l
Precio unitario	2,39 €

DOS EUROS CON TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS

0208 Placa PCB de distribución	unidad
Precio unitario	0,97 €

CERO EUROS CON NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS

**Instalación de baja
intensidad**

0301 Controladora de vuelo NAZA V2 + GPS	unidad
Precio unitario	269,1 €

DOSCIENTOS SESENTA Y NUEVE EUROS CON DIEZ
CÉNTIMOS

0302 Data link + Waypoint bluetooth	unidad
Precio unitario	149,99 €

CIENTO CUARENTA Y NUEVE EUROS CON NOVENTA Y NUEVE
CÉNTIMOS

0303 Mini i OSD	unidad
Precio unitario	59 €

CINCUENTA Y NUEVE EUROS CON CERO CÉNTIMOS

0304 Conector JST 2 pines, macho-hembra	unidad
Precio unitario	0,44 €

CERO EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

		unida d
0305 Conector Dupont 2,54mm 3 pines, macho		pieza
Precio unitario	0,2	€

CERO EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS

		unida d
0306 BEC DC-DC 3A 12-5V		pieza
Precio unitario	1,98	€

UN EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS

		unida d
0307 Cable de silicona 30 AWG, rojo		m.l
Precio unitario	0,198	€

CERO EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS

		unida d
0308 Cable de silicona 30 AWG, negro		m.l
Precio unitario	0,198	€

CERO EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS

		unida d
0309 Cable de silicona 30 AWG, amarillo		m.l
Precio unitario	0,198	€

CERO EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS

		unida d
0310 Telemetría, iOSD Remzibi		pieza
Precio unitario	34,99	€

TREINTA Y CUATRO EUROS CON NOVENTA Y NUEVE
CÉNTIMOS

		unida d
0311 Cámara de video 600 TVL 1.8 mm CMOS 170° PAL		pieza
Precio unitario	8,13	€

OCHO EUROS CON TRECE CÉNTIMOS

	unida d
0312 Emisor de video 600 mW, 32CH 5.8 GHz	pieza
Precio unitario	17,99 €

DIECISITE EUROS CON NOVENTA Y NUEVE CÉNTIMOS

**Instalación de fitosanitario para el vehículo de
tierra**

	unida d
0401 Bomba acuarios 60 W 12 V alta presión 100 PSI	pieza
Precio unitario	16,89 €

DIECISÉIS EUROS CON OCHENTA Y NUEVE CÉNTIMOS

	unida d
0402 Tubo silicona 6x4 mm	m.l
Precio unitario	0,52 €

CERO EUROS CON CINCUENTA Y DOS
CÉNTIMOS

	unida d
0403 Boquilla	pieza
Precio unitario	15 €

QUINCE EUROS CON CERO
CÉNTIMOS

	unida d
0404 Depósito fitosanitario	pieza
Precio unitario	40 €

CUARENTA EUROS CON CERO CÉNTIMOS

		unida d
0405	Válvula de paso	pieza
Precio unitario	5	€

CINCO EUROS CON CERO
CÉNTIMOS

		unida d
0406	Abrazaderas ϕ	pieza
Precio unitario	0,5	€

CERO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

		unida d
0407	Generador compacto de electricidad inverter 1000 W 50cm³	pieza
Precio unitario	231, 8	€

DOSCIENTOS TREINTA Y UN EUROS CON OCHENTA
CÉNTIMOS

		unida d
0408	Convertidor 220-12 V 1000W	pieza
Precio unitario	30,0 8	€

TREINTA EUROS CON OCHO
CÉNTIMOS

		unida d
0409	Regulador de velocidad 12-40V 10A DC	pieza
Precio unitario	3,34	€

TRES EUROS CON TREINTA Y CUATRO
CÉNTIMOS

Instalación de fitosanitario desde el propio vehículo

		unida d
0501	Mini bomba acuarios 12V	pieza
Precio unitario	5,2	€

CINCO EUROS CON VEINTE
CÉNTIMOS

		unida d
0502	Tubo silicona 6x4 mm	m.l
Precio unitario	0,5 2	€

CERO EUROS CON CINCUENTA Y DOS
CÉNTIMOS

		unida d
0503	Depósito fitosanitario	pieza
Precio unitario	5	€

CINCO EUROS CON CERO
CÉNTIMOS

Mecánica del vehículo de tierra suministrador de energía y fitosanitario

		unidad
0601 Servo 15 kg		pieza
Precio unitario	4,81	€

CUATRO EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS

		unidad
0602 Rodamientos 608HZZ		m.l
Precio unitario	0,5	€

CERO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

		unidad
0603 Motor 550+reductora 16 rpm 12V		pieza
Precio unitario	18,99	€

DIECIOCHO EUROS CON NOVENTA Y NUEVE CÉNTIMOS

		unidad
0604 Rueda 110 mmm crawler + llanta		pieza
Precio unitario	4,50	€

CUATRO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

		unidad
0605 Varilla M12		m.l
Precio unitario	1	€

UN EURO CON CERO CÉNTIMOS

		unidad
0606 Tuercas M12		pieza
Precio unitario	0,5	€

CERO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

		unidad
0607 Tornillo M2x12		pieza
Precio unitario	0,8	€

CERO EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS

		unidad
0608 Rodamiento axial 10x22x9		pieza
Precio unitario	2	€

DOS EUROS CON CERO CÉNTIMOS

		unidad
0609 Regulador de velocidad 12 V (320A de pico) DC		pieza
Precio unitario	13,55	€

TRECE EUROS CON CINCUENTA Y CINCO CÉNTIMOS

		unidad
0609 Varilla M8		m.l
Precio unitario	0,9	€

CERO EUROS CON NOVENTA CÉNTIMOS

Dispositivo de arrollamiento automático de manguera

		unidad
0701 Servo 15kg		pieza
Precio unitario	4,81	€

CUATRO EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS

		unidad
0702 Tubo silicona 6x4 mm		m.l
Precio unitario	0,52	€

CERO EUROS CON CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS

		unidad
0703 Sensor fotoeléctrico de correlación		pieza
Precio unitario	1,98	€

UN EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS

			unidad
0704	Arduino UNO		pieza
	Precio unitario	3,6	€

TRES EUROS CON SESENTA CÉNTIMOS

			unidad
0705	Rodamientos 608HZZ		pieza
	Precio unitario	0,5	€

CERO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

			unidad
0706	Tornillos M8x25 mm		pieza
	Precio unitario	0,5	€

CERO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

			unidad
0707	Tornillos M2x12		pieza
	Precio unitario	0,2	€

CERO EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS

Deflector tipo I, estructura

			unidad
0801	Varilla roscada acero cincada M 4		m.l
	Precio unitario	2,54	€

DOS EUROS CON CINCUENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

			unidad
0802	Tuercas M 4		pieza
	Precio unitario	0,1	€

CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS

		unidad
0803 Tornillo M2x8 + tuerca		pieza
Precio unitario	0,05	€

CERO EUROS CON CINCO CÉNTIMOS

		unidad
0804 Tornillo M3 x25 + tuerca		pieza
Precio unitario	0,5	€

CERO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

		unidad
0805 Placa fibra de vidrio		pieza
Precio unitario	10	€

DIEZ EUROS CON CERO CÉNTIMOS

Deflector tipo I instalación eléctrica

		unidad
0901 Servo		pieza
Precio unitario	4,81	€

CUATRO EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS

		unidad
0902 Sensor MPU 2050		pieza
Precio unitario	2,07	€

DOS EUROS CON SIETE CÉNTIMOS

		unidad
0903 Arduino Uno		pieza
Precio unitario	3,6	€

TRES EUROS CON SESENTA CÉNTIMOS

	unidad
0904 Regulador de tensión 3A - 5V	pieza
Precio unitario	1,98 €

UN EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS

	unidad
0905 Placa perforada de soldadura 70x90 mm	pieza
Precio unitario	0,85 €

CERO EUROS CON OCHENTA Y CINCO CÉNTIMOS

	unidad
0906 Kit cableado Arduino macho - macho	pieza
Precio unitario	2,29 €

DOS EUROS CON VEINTINUEVE CÉNTIMOS

Deflector tipo II estructura

	unidad
1001 Tornillo M 2 x12	pieza
Precio unitario	0,2 €

CERO EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS

	unidad
1002 Tuerca M 2	pieza
Precio unitario	0,1 €

CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS

	unidad
1003 Arandela M 2 Nailon	pieza
Precio unitario	0,1 €

CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS

	unidad
1004 Varilla fibra de vidrio ϕ 4mm	m.l
Precio unitario	2,5 €

DOS EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

		unidad
1005 Placa fibra de vidrio 80x200 mm		pieza
Precio unitario	10	€

DIEZ EUROS CON CERO CÉNTIMOS

		unidad
1006 Hilo de Nailon ϕ		m.l
Precio unitario	0,1	€

CERO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS

Instalación eléctrica deflector II

		unida d
1101 Servomotor		pieza
Precio unitario	4,8 1	€

CUATRO EUROS CON OCHENTA Y UN
CÉNTIMOS

		unida d
1102 Arduino Uno		pieza
Precio unitario	3,6	€

TRES EUROS CON SESENTA
CÉNTIMOS

		unida d
1103 Kit cableado Arduino macho - macho		pieza
Precio unitario	2,2 9	€

DOS EUROS CON VEINTINUEVE CÉNTIMOS

		unida d
1104 Regulador de tensión 3A - 5V		pieza

Precio unitario	1,9 8	€
------------------------	----------	---

UN EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS

**Estación de
tierra**

	unida d
1201 Emisora de radio 9 canales Turnigy	pieza
Precio unitario	53,9 9 €

CINCUENTA Y TRES EUROS CON NOVENTA Y NUEVE
CÉNTIMOS

	unida d
1202 Monitor 7" LCD	pieza
Precio unitario	35,9 9 €

TREINTA Y CINCO EUROS CON NOVENTA Y NUEVE
CÉNTIMOS

	unida d
1203 Receptor de video 5,8 GHz RC805	pieza
Precio unitario	17,9 8 €

DIECISITE EUROS CON NOVENTA Y OCHO
CÉNTIMOS

	unida d
1204 Antena cloverleaf 5,8 GHz	pieza
Precio unitario	6,69 €

SEIS EUROS CON SESENTA Y NUEVE CÉNTIMOS

	unida d
1205 Antena hélice polarizada a izquierda 5,8 GHz	pieza

Precio unitario	9,99 €
------------------------	--------

NUEVE EUROS CON NOVENTA Y NUEVE
CÉNTIMOS

		unida d
1206	Soporte monitor de fibra de carbono	pieza
Precio unitario	11,09	€

ONCE EUROS CON NUEVE
CÉNTIMOS

		unida d
1207	Parasol para monitor	pieza
Precio unitario	4,54	€

CUATRO EUROS CON CINCUENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

		unida d
1208	Conector Jack 2,5mm - RCA	pieza
Precio unitario	2,32	€

DOS EUROS CON TREINTA Y DOS CÉNTIMOS

Almacenamiento de energía

		unida d
1301	Batería LiPo 5.1 Ah 3S1P 35C	pieza
Precio unitario	79,9	€

		unida d
1302	Batería LiPo 500 mAh 3S1P 20C	pieza
Precio unitario	4,31	€

		unida d
1303	Batería LiPo 700 mAh 3S1P 35C	pieza
	Precio unitario	5,47 €

		unida d
1304	Batería LiPo 2650 mAh 3S1P 1C	pieza
	Precio unitario	12,5 6 €

		unida d
1305	Alarma de bajo voltaje	pieza
	Precio unitario	2,05 €

		unida d
1306	Cargador - Balanceador Turnigy accucel 50 W 6 A	pieza
	Precio unitario	20,6 9 €

		unida d
1307	Fuente de alimentación 105 W 7 A	pieza
	Precio unitario	12,5 9 €

DOCE EUROS CON CINCUENTA Y NUEVE
CÉNTIMOS

		unida d
1308	Bolsa ignífuga o retardante de llama para batería, 230x140 mm	pieza
	Precio unitario	2,22 €

DOS EUROS CON VEINTIDOS CÉNTIMOS

		unida d
1309	Protector de silicona para impactos en la batería	pieza
	Precio unitario	0,77 €

CERO EUROS CON SETENTA Y SIETE
CÉNTIMOS

		unida d
1310	Sensor de temperatura para batería	pieza
	Precio unitario	3,73 €

TRES EUROS CON SETENTA Y TRES
CÉNTIMOS

		unida d
1311	Velcro no adhesivo, soporte para baterías 330 mm	pieza
	Precio unitario	1,52 €

UN EUROS CON CINCUENTA Y DOS
CÉNTIMOS**Mano de obra**

		unidad
1401	Operario taller mecánico	hora
	Precio unitario	5,08 €

CINCO EUROS CON OCHO CÉNTIMOS

		unidad
1402	Operario taller electrónico	hora
	Precio unitario	5,08 €

CINCO EUROS CON OCHO CÉNTIMOS

23.2. Presupuestos parciales**Chasis**

			unidad
0101	Extremidad F450		pieza
	Precio unitario	4,59	€
	Cantidad	4	
	Total	18,36	€
			unidad
0102	Tren de aterrizaje		pieza
	Precio unitario	3,03	€
	Cantidad	1	
	Total	3,03	€
			unidad
0103	Tornillo acero M 2.5 x 6 mm		pieza
	Precio unitario	0,1	€
	Cantidad	15	
	Total	1,5	€
			unidad
0104	Tornillo M 3 x 6 mm		pieza
	Precio unitario	0,1	€
	Cantidad	15	
	Total	1,5	€
			unidad
0105	Arandela M 2.5		pieza
	Precio unitario	0,05	€
	Cantidad	15	
	Total	0,75	€
			unidad
0106	Arandela M 3		pieza
	Precio unitario	0,05	€
	Cantidad	15	
	Total	0,75	€
			unidad

0107 Tuerca autoblocante M 2.5	pieza
Precio unitario	0,1 €
Cantidad	15
Total	1,5 €
	unidad
0108 Tuerca autoblocante M 3	pieza
Precio unitario	0,1 €
Cantidad	15
Total	1,5 €
	unidad
0109 Hélice fibra de carbono Slow Fly 12x3.8"	pieza
Precio unitario	4,38 €
Cantidad	8
Total	35,04 €
	unidad
0110 Tuerca M4	pieza
Precio unitario	0,05 €
Cantidad	15
Total	0,75 €
	unidad
0111 Arandela M4	pieza
Precio unitario	0,05 €
Cantidad	15
Total	0,75 €
	unidad
0112 Brida	pieza
Precio unitario	0,1 €
Cantidad	15
Total	1,5 €
	unidad
0113 Cinta adhesiva elastómero acrílico 5mm VHB 4910	m.l
Precio unitario	2,33 €
Cantidad	0,5
Total	1,165 €

Referencia	Concepto	Importe
0101	Extremidad F450	18,36
0102	Tren de aterrizaje	3,03

0103	Tornillo acero M 2.5 x 6 mm	1,5
0104	Tornillo M 3 x 6 mm	1,5
0105	Arandela M 2.5	0,75
0106	Arandela M 3	0,75
0107	Tuerca autoblocante M 2.5	1,5
0108	Tuerca autoblocante M 3	1,5
0109	Hélice fibra de carbono Slow Fly 12x3.8"	35,04
0110	Tuerca M4	0,75
0111	Arandela M4	0,75
0112	Brida	1,5
0113	Cinta adhesiva elastómero acrílico 5mm VHB 4910	1,165
Total		68,095 €

Instalación de alta intensidad

		unidad
0201	Variador de velocidad, ESC 25 A	pieza
	Precio unitario	10,6 €
	Cantidad	4
Total		42,4 €

		unidad
0202	Motor Brushless outrunner 240 W	pieza
	Precio unitario	10,96 €
	Cantidad	4
Total		43,84 €

		unidad
0203	Conector individual, macho - hembra tipo banana ϕ 2mm	pieza
	Precio unitario	0,121 €
	Cantidad	2
Total		0,242 €

		unidad
0204	Conector hembra XT-60	pieza
	Precio unitario	1,41 €
	Cantidad	1
Total		1,41 €

		unidad
0205	Conector banana ϕ 4 mm	pieza
	Precio unitario	4,5 €
	Cantidad	2
	Total	9 €

		unidad
0206	Cable de silicona 10 AWG	m.l
	Precio unitario	4,39 €
	Cantidad	2
	Total	8,78 €

		unidad
0207	Termo-retráctil ϕ 8 mm	m.l
	Precio unitario	2,39 €
	Cantidad	2
	Total	4,78 €

		unidad
0208	Placa PCB de distribución	pieza
	Precio unitario	0,97 €
	Cantidad	1
	Total	0,97 €

Referencia	Concepto	Importe
0201	Variador de velocidad, ESC 25 A	42,4
0202	Motor Brushless outrunner 240 W	43,84
0203	Conector individual, macho - hembra tipo banana ϕ 2mm	0,242
0204	Conector hembra XT-60	1,41
0205	Conector banana ϕ 4 mm	9
0206	Cable de silicona 10 AWG	8,78
0207	Termo-retráctil ϕ 8 mm	4,78
0208	Placa PCB de distribución	0,97
	Total	111,422 €

Instalación de baja intensidad

		unidad
0301	Controladora de vuelo NAZA V2 + GPS	pieza
Precio unitario	269,1	€
Cantidad	1	
Total	269,1	€
0302	Datalink + Waypoint bluetooth	pieza
Precio unitario	149,99	€
Cantidad	1	
Total	149,99	€
0303	Mini iOSD	pieza
Precio unitario	59	€
Cantidad	1	
Total	59	€
0304	Conector JST 2 pines, macho-hembra	pieza
Precio unitario	0,44	€
Cantidad	2	
Total	0,88	€
0305	Conector Dupont 2,54mm 3 pines, macho	pieza
Precio unitario	0,2	€
Cantidad	12	
Total	2,4	€
0306	BEC DC-DC 3A 12-5V	pieza
Precio unitario	1,98	€
Cantidad	2	

Total	3,96	€
-------	------	---

		unidad
0307	Cable de silicona 30 AWG, rojo	m.l
Precio unitario	0,198	€
Cantidad	2	
Total		0,396 €

		unidad
0308	Cable de silicona 30 AWG, negro	m.l
Precio unitario	0,198	€
Cantidad	2	
Total		0,396 €

		unidad
0309	Cable de silicona 30 AWG, amarillo	m.l
Precio unitario	0,198	€
Cantidad	2	
Total		0,396 €

		unidad
0310	Telemetría, iOSD Remzibi	pieza
Precio unitario	34,99	€
Cantidad	1	
Total		34,99 €

		unidad
0311	Cámara de video 600 TVL 1.8 mm CMOS 170° PAL	pieza
Precio unitario	8,13	€
Cantidad	1	
Total		8,13 €

		unidad
0312	Emisor de video 600 mW, 32CH 5.8 GHz	pieza
Precio unitario	17,99	€
Cantidad	1	
Total		17,99 €

Referencia	Concepto	Importe
0301	Controladora de vuelo NAZA V2 + GPS	269,1
0302	Datalink + Waypoint bluetooth	149,99
0303	Mini iOSD	59
0304	Conector JST 2 pines, macho-hembra	0,88
0305	Conector Dupont 2,54mm 3 pines, macho	2,4

0306	BEC DC-DC 3A 12-5V	3,96
0307	Cable de silicona 30 AWG, rojo	0,396
0308	Cable de silicona 30 AWG, negro	0,396
0309	Cable de silicona 30 AWG, amarillo	0,396
0310	Telemetría, iOSD Remzibi	34,99
0311	Cámara de video 600 TVL 1.8 mm CMOS 170° PAL	8,13
0312	Emisor de video 600 mW, 32CH 5.8 GHz	17,99

Total 547,628 €

Instalación de fitosanitario para estación de tierra

	unida d
0401 Bomba acuarios 60 W 12 V alta presión 100 PSI	pieza
Precio unitario	16,89 €
Cantidad	1
Tot al	16,89 €

	unida d
0402 Tubo silicona 6x4 mm	m.l
Precio unitario	0,52 €
Cantidad	13
Tot al	6,76 €

	unida d
0403 Boquilla	pieza
Precio unitario	15 €
Cantidad	1
Tot al	15 €

	unida d
0404 Depósito fitosanitario	pieza
Precio unitario	40 €
Cantidad	1

234

Referencia	Concepto	Importe
0401	Bomba acuarios 60 W 12 V alta presión 100 PSI	16,89
0402	Tubo silicona 6x4 mm	6,76
0403	Boquilla	15
0404	Depósito fitosanitario	40
0405	Válvula de paso	16
0406	Abrazaderas ϕ	4
0407	Generador compacto de electricidad inverter 1000 W 50cm3	231,8
0408	Convertidor 220-12 V 1000W	30,08
0409	Regulador de velocidad 12-40V 10A DC	3,34
Total		363,87 €

Instalación de fitosanitario desde el propio vehículo

	unidad
0501 Mini bomba acuarios 12V	pieza
Precio unitario	5,2 €
Cantidad	1
Total	5,2 €

	unidad
0502 Tubo silicona 6x4 mm	m.l
Precio unitario	0,52 €
Cantidad	1
Total	0,52 €

	unidad
0503 Depósito fitosanitario	pieza
Precio unitario	5 €
Cantidad	1
Total	5 €

Referencia	Concepto	Importe
0501	Mini bomba acuarios 12V	5,2
0502	Tubo silicona 6x4 mm	0,52
0503	Depósito fitosanitario	5

Total	10,72	€
--------------	--------------	----------

Mecánica del vehículo de tierra suministrador de energía y fitosanitario

			unida d
0601	Servo 15 kg		pieza
	Precio unitario	4,81	€
	Cantidad	4	
	Tota	19,2	
	l	4	€
			unida d
0602	Rodamientos 608HZZ		m.l
	Precio unitario	0,5	€
	Cantidad	8	
	Tota		
	l	4	€
			unida d
0603	Motor 550+reductora 16 rpm 12V		pieza
	Precio unitario	18,9	€
	Cantidad	4	
	Tota	75,9	
	l	6	€
			unida d
0604	Rueda 110 mmm crawler + llanta		pieza
	Precio unitario	4,50	€
	Cantidad	4	
	Tota	17,9	
	l	9	€
			unida d
0605	Varilla M12		m,l
	Precio unitario	1	€
	Cantidad	1	

		Tota	
		l	1 €
		unida	
0606 Tuercas M12		pieza	
Precio unitario	0,5	€	
Cantidad	4		
		Tota	
		l	2 €
		unida	
0607 Tornillo M2x12		pieza	
Precio unitario	0,8	€	
Cantidad	1		
		Tota	
		l	0,8 €
		unida	
0608 Rodamiento axial 10x22x9		pieza	
Precio unitario	2	€	
Cantidad	1		
		Tota	
		l	2 €
		unida	
0609 Regulador de velocidad 12 V (320A de pico) DC		pieza	
Precio unitario	13,5	€	
	5		
Cantidad	4		
		Tota	
		l	54,2 €
		unida	
0610 Varilla M8		m.l	
Precio unitario	0,9	€	
Cantidad	1		
		Tota	
		l	0,9 €
		unida	
0611 Tuerca M8		pieza	

Precio unitario	0,5	€
Cantidad	12	
Total	6	€

Referencia	Concepto	Importe
0601	Servo 15 kg	19,24
0602	Rodamientos 608HZZ	4
0603	Motor 550+reductora 16 rpm 12V	75,96
0604	Rueda 110 mm crawler + llanta	17,99
0605	Varilla M12	1
0606	Tuercas M12	2
0607	Tornillo M2x12	0,8
0608	Rodamiento axial 10x22x9	2
0609	Regulador de velocidad 12 V (320A de pico) DC	54,2
0610	Varilla M8	54,2
0611	Tuerca M8	0,9
		6
Total		238,29 €

Dispositivo de arrollamiento automático de manguera

	unidad
0701 Servo 15kg	pieza
Precio unitario	4,81 €
Cantidad	1
Total	4,81 €

	unidad
0702 Tubo silicona 6x4 mm	m.l
Precio unitario	0,52 €
Cantidad	20
Total	10,4 €

	unidad
0703 Sensor fotoeléctrico de correlación	pieza
Precio unitario	1,98 €
Cantidad	1
Total	1,98 €

		unidad
0704 Arduino UNO		pieza
Precio unitario	3,6	€
Cantidad	1	
Total	3,6	€

		unidad
0705 Rodamientos 608HZZ		pieza
Precio unitario	0,5	€
Cantidad	3	
Total	1,5	€

		unidad
0706 Tornillos M8x25 mm		pieza
Precio unitario	0,5	€
Cantidad	2	
Total	1	€

		unidad
0707 Tornillos M2x12		pieza
Precio unitario	0,2	€
Cantidad	6	
Total	1,2	€

		unidad
0708 Tuerca M2		pieza
Precio unitario	0,1	€
Cantidad	6	
Total	0,6	€

Referencia	Concepto	Importe
0701	Servo 15kg	4,81
0702	Tubo silicona 6x4 mm	10,4
0703	Sensor fotoeléctrico de correlación	1,98
0704	Arduino UNO	3,6
0705	Rodamientos 608HZZ	1,5
0706	Tornillos M8x25 mm	1
0707	Tornillos M2x12	1,2
0708	Tuerca M2	0,6
Total		23,29 €

Deflector tipo I, estructura

		unidad
0801 Varilla roscada acero cincada M 4		m.l
Precio unitario	2,54	€
Cantidad	1	
Total	2,54	€

		unidad
0802 Tuercas M 4		pieza
Precio unitario	0,1	€
Cantidad	12	
Total	1,2	€

		unidad
0803 Tornillo M2x8 + tuerca		pieza
Precio unitario	0,05	€
Cantidad	12	
Total	0,6	€

		unidad
0804 Tornillo M3 x 25 + tuerca		pieza
Precio unitario	0,5	€
Cantidad	12	
Total	6	€

		unidad
0805 Placa fibra de vidrio		pieza
Precio unitario	10	€
Cantidad	1	
Total	10	€

Referencia	Concepto	Importe
0801	Varilla roscada acero cincada M 4	2,54
0802	Tuercas M 4	1,2
0803	Tornillo M2x8 + tuerca	0,6
0804	Tornillo M3 x 25 + tuerca	6
0805	Placa fibra de vidrio	10
Total		20,34 €

Deflector tipo I instalación eléctrica

		unidad
0901 Servo		pieza
Precio unitario	4,81	€
Cantidad	4	
Total	19,24	€

		unidad
0902 Sensor MPU 2050		pieza
Precio unitario	2,07	€
Cantidad	1	
Total	2,07	€

		unidad
0903 Arduino Uno		pieza
Precio unitario	3,6	€
Cantidad	1	
Total	3,6	€

		unidad
0904 Regulador de tensión 3A - 5V		pieza
Precio unitario	1,98	€
Cantidad	1	
Total	1,98	€

		unidad
0905 Placa perforada de soldadura 70x90 mm		pieza
Precio unitario	0,85	€
Cantidad	1	
Total	0,85	€

		unidad
0906 Kit cableado Arduino macho - macho		pieza
Precio unitario	2,29	€
Cantidad	1	
Total	2,29	€

Referencia	Concepto	Importe
0901	Servo	19,24
0902	Sensor MPU 2050	2,07

0903	Arduino Uno	3,6
0904	Regulador de tensión 3A - 5V	1,98
0905	Placa perforada de soldadura 70x90 mm	0,85
0906	Kit cableado Arduino macho - macho	2,29

Total	30,03	€
--------------	--------------	----------

Deflector tipo II estructura

		unidad
1001 Tornillo M 2 x12		pieza
Precio unitario	0,2	€
Cantidad	25	
Total	5	€

		unidad
1002 Tuerca M 2		pieza
Precio unitario	0,1	€
Cantidad	25	
Total	2,5	€

		unidad
1003 Arandela M 2 Nailon		pieza
Precio unitario	0,1	€
Cantidad	25	
Total	2,5	€

		unidad
1004 Varilla fibra de vidrio ϕ 3mm		m.l
Precio unitario	2,5	€
Cantidad	10	
Total	25	€

		unidad
1005 Placa fibra de vidrio 80x200 mm		pieza
Precio unitario	10	€
Cantidad	1	
Total	10	€

		unidad
1006 Hilo de Nailon ϕ		m.l
Precio unitario	0,1	€
Cantidad	2	

Total	0,2	€
-------	-----	---

Referencia	Concepto	Importe
1001	Tornillo M 2 x12	5
1002	Tuerca M 2	2,5
1003	Arandela M 2 Nailon	2,5
1004	Varilla fibra de vidrio ϕ	25
1005	Placa fibra de vidrio 80x200 mm	10
1006	Hilo de Nailon ϕ	0,2
Total		45,2 €

Instalación eléctrica deflector II

	unidad
1101 Servomotor	pieza
Precio unitario	4,81 €
Cantidad	4
Total 19,24 €	

	unidad
1102 Arduino Uno	pieza
Precio unitario	3,6 €
Cantidad	1
Total 3,6 €	

	unidad
1103 Kit cableado Aduino macho - macho	pieza
Precio unitario	2,29 €
Cantidad	1
Total 2,29 €	

	unidad
1104 Regulador de tensión 3A - 5V	pieza
Precio unitario	1,98 €
Cantidad	1
Total 1,98 €	

Referencia	Concepto	Importe
------------	----------	---------

1101	Servomotor	19,24
1102	Arduino Uno	3,6
1103	Kit cableado Arduino macho - macho	2,29
1104	Regulador de tensión 3A - 5V	1,98

Total	27,11	€
--------------	--------------	----------

Estación de tierra

		unidad
1201	Emisora de radio 9 canales Turnigy	pieza
	Precio unitario	53,99 €
	Cantidad	1
	Total	53,99 €

		unidad
1202	Monitor 7" LCD	pieza
	Precio unitario	35,99 €
	Cantidad	1
	Total	35,99 €

		unidad
1203	Receptor de video 5,8 GHz RC805	pieza
	Precio unitario	17,98 €
	Cantidad	1
	Total	17,98 €

		unidad
1204	Antena cloverleaf 5,8 GHz	pieza
	Precio unitario	6,69 €
	Cantidad	2
	Total	13,38 €

		unidad
1205	Antena hélice polarizada a izquierda 5,8 GHz	pieza
	Precio unitario	9,99 €
	Cantidad	1
	Total	9,99 €

		unidad
1206	Soporte monitor de fibra de carbono	pieza
	Precio unitario	11,09 €
	Cantidad	1

Total	11,09	€
-------	-------	---

		unidad
1207	Parasol para monitor	pieza
	Precio unitario	4,54 €
	Cantidad	1
Total		4,54 €

		unidad
1208	Conector Jack 2,5mm - RCA	pieza
	Precio unitario	2,32 €
	Cantidad	1
Total		2,32 €

Referencia	Concepto	Importe
1201	Emisora de radio 9 canales Turnigy	53,99
1202	Monitor 7" LCD	35,99
1203	Receptor de video 5,8 GHz RC805	17,98
1204	Antena cloverleaf 5,8 GHz	13,38
1205	Antena hélice polarizada a izquierda 5,8 GHz	9,99
1206	Soporte monitor de fibra de carbono	11,09
1207	Parasol para monitor	4,54
1208	Conector Jack 2,5mm - RCA	2,32

Total	149,28	€
-------	--------	---

Almacenamiento de energía

		unidad
1301	Batería LiPo 5.1 Ah 3S1P 35C	pieza
	Precio unitario	79,9 €
	Cantidad	2
Total		159,8 €

		unidad
1302	Batería LiPo 500 mAh 3S1P 20C	pieza
	Precio unitario	4,31 €
	Cantidad	1
Total		4,31 €

		unidad
1303	Batería LiPo 700 mAh 3S1P 35C	pieza

	Precio unitario	5,47	€
	Cantidad	1	
	Total	5,47	€
			unidad
1304	Batería LiPo 2650 mAh 3S1P 1C		pieza
	Precio unitario	12,5	€
	Cantidad	6	
	Total	12,5	
		6	€
			unidad
1305	Alarma de bajo voltaje		pieza
	Precio unitario	2,05	€
	Cantidad	3	
	Total	6,15	€
			unidad
1306	Cargador - Balanceador Turnigy accucel 50 W 6 A		pieza
	Precio unitario	20,6	€
	Cantidad	9	
	Total	20,6	
		9	€
			unidad
1307	Fuente de alimentación 105 W 7 A		pieza
	Precio unitario	12,5	€
	Cantidad	9	
	Total	12,5	
		9	€
			unidad
1308	Bolsa ignífuga o retardante de llama para batería, 230x140 mm		pieza
	Precio unitario	2,22	€
	Cantidad	1	
	Total	2,22	€
			unidad
1309	Protector de silicona para impactos en la batería		pieza
	Precio unitario	0,77	€
	Cantidad	2	
	Total	1,54	€

	unidad
1310 Sensor de temperatura para batería	pieza
Precio unitario	3,73 €
Cantidad	1
Total	3,73 €

	unidad
1311 Velcro no adhesivo, soporte para baterías 330 mm	pieza
Precio unitario	1,52 €
Cantidad	2
Total	3,04 €

Referencia	Concepto	Importe
1301	Batería LiPo 5.1 Ah 3S1P 35C	159,8
1302	Batería LiPo 500 mAh 3S1P 20C	4,31
1303	Batería LiPo 700 mAh 3S1P 35C	5,47
1304	Batería LiPo 2650 mAh 3S1P 1C	12,56
1305	Alarma de bajo voltaje	6,15
	Cargador - Balanceador Turnigy accucel 50 W 6 A	
1306		20,69
1307	Fuente de alimentación 105 W 7 A	12,59
	Bolsa ignífuga o retardante de llama para batería, 230x140 mm	
1308		2,22
1309	Protector de silicona para impactos en la batería	1,54
1310	Sensor de temperatura para batería	3,73
	Velcro no adhesivo, soporte para baterías 330 mm	
1311		3,04
Total		232,1 €

Mano de obra

	unidad
1401 Operario taller mecánico	hora

Precio unitario	5,08	€
Cantidad	60	
Total	304,8	€

			unidad
1402	Operario taller electrónico		hora
Precio unitario	5,08	€	
Cantidad	70		
	Total	355,6	€

Referencia	Concepto	Importe
1401	Operario taller mecánico	304,8
1402	Operario taller electrónico	355,6
Total	660,4	€

23.3. Presupuesto general

Presupuesto general

Presupuestos parciales	Importe
Chasis	68,095 €
Instalación de alta intensidad	111,422 €
Instalación de baja intensidad	547,628 €
Instalación de fluido fitosanitario considerando vehículo de tierra	363,87 €
Instalación de fluido fitosanitario considerando suministro desde el propio vehículo	10,72 €
Chasis del vehículo autónomo suministrador de fitosanitario y energía eléctrica	238,29 €
Dispositivo de arrollamiento automático de manguera	23,29 €
Chasis deflector tipo I	20,34 €
Instalación eléctrica deflector tipo I	30,03 €
Chasis deflector tipo II	45,2 €
Instalación eléctrica deflector tipo II	27,11 €
Estación de tierra	149,28 €
Almacenamiento de energía	232,1 €

Mano de obra 660,4 €

Subtotal	2527,77
I	5 €

Concepto	Porcentaje	Cantidad
Gastos generales	10	252,78 €
Beneficio industrial	13	328,61 €
Gastos de envío	5	126,39 €
Total presupuesto a contrata		3235,55 €
IVA	21	679,47 €
Total presupuesto con IVA		3915,02 €

El coste total de la ejecución del proyecto asciende hasta una cantidad de:

3915,02 €

TRES MIL NOVECIENTOS QUINCE EUROS CON DOS CÉNTIMOS

24. PLANOS

En el documento planos se puede distinguir 4 partes diferenciadas, siendo estas las correspondientes a los cuatro diseños más importantes realizado.

- Deflector tipo I
- Deflector tipo II
- Vehículo autónomo terrestre
- Suministro de conducto de fitosanitario

**Nota: Los planos correspondientes el vehículo autónomo (plano general, plano de despiece, componentes comerciales, estructura del vehículo y otros componentes) son insuficientes para una completa definición del sistema. Como tal, el vehículo autónomo terrestre es otro TFG, siendo el objetivo de este y en consecuencia de los planos generados mostrar una visión al lector de la idea propuesta, para seguir desarrollándola en trabajos futuros.*

25. BIBLIOGRAFÍA

- 3M. <http://www.3m.com/>. [En línea]
Abaqus. Guide.
Andalucía, UNIA. Universidad Internacional de. 2015. *Curso Drones hoy, normativa, usos y mercados.* Baeza : s.n., 2015.
Andalucía., UNIA. Universidad Internacional de. 2016. *Curso de olivicultura de precisión.* Baeza : s.n., 2016.
Balanis, Constantine A. 2º Edición. *Antenna theory analysis and desing.* s.l. : John Willey, 2º Edición.
Bearing, SKF. Rodamientos SKF. [En línea]
BOSCH. 4ª Ed. 2005. *Manual de la técnica del automóvil.* 4ª Ed. 2005.
Boto Fidalgo, Juan Antonio y López Díez, Francisco Javier. 1999. *La aplicación de fitosanitarios y fertilizantes.* León : Universidad de León, 1999.
Büchi, Roland. 2014. *Radiocontrol with 2.4 GHz.* s.l. : Book on demand, 2014.
Budynas, Richard G. y Nisbett, J.Keith. Octava Ed. 2008. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* s.l. : McGraw Hill, Octava Ed. 2008.
Bueno, Benilde. 2015. *Reglamento electrotécnico para baja tensión.* s.l. : Marcombo, 2015.
car, ESC. [En línea]
Casarrubios, ATO-210. 2016. *Curso teórico piloto de UAV y RPAs.* Madrid : s.n., 2016.
Chapman. Máquinas y generadores electricos. s.l. : McGraw Hill.
Choosing the right propeller. **Berserkr, Arthur. 2015.** 2015, Rookie RC flyer.
Collado, Alberto García. *Apuntes asignatura Integridad Estructural en Elementos Mecánicos.*
 —. **2015.** *Apuntes de Métodos Avanzados de Cálculo en Ingeniería Mecánica.* 2015.
company, RTP. <http://web.rtpcompany.com/info/data/0200/>. [En línea]
DJI. BTU (Bluetooth Unit) Manual.
 —. *Ground Station User Manual.*
 —. <http://www.dji.com/es>. [En línea]
 —. *NAZA-M Quick Start Guide.*
Escamilla, Pedro Luque. *Apuntes de asignatura Máquinas e Instalaciones de Fluidos.* [En línea]
forum, Electric. <http://www.electricforum.com/>. [En línea]
Fraile Mora, Jesús. 2008. *Máquinas eléctricas.* Madrid : McGraw Hill, 2008.
Future, Robotic Farming For The.
<http://www.roboticstomorrow.com/article/2014/12/robotic-farming-for-the-future/5238>. [En línea]
Gallego Álvarez, Francisco Javier y Martín Doñate, Cristina. 2015. *Asignatura de Técnicas de Ingeniería Gráficas Aplicadas a Ingeniería Mecánica.* 2015.
Garland, Generadores. <http://www.garland.es/productos/generadores>. [En línea]
Goñi, Miguel J. 1986. *Biblioteca básica electrónica. Antenas, emisoras y receptoras.* s.l. : Nueva lente, 1986. 31.

- . 1986. *Biblioteca básica Electrónica. Antenas colectivas, principios básicos*. s.l. : Nueva lente, 1986. 32.
- Historia, Canal**. <http://www.history.com/>. [En línea]
- Hünecke, Klaus**. 2000. *Jet Engines. Fundamentals or Theory, Desingn and Operation*. s.l. : Motorbooks International, 2000.
- Krishnan, R. (Ramu)**. 2010. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives / R. Krishnan*. s.l. : CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- Landau, L. D y Lifshitz, E. M.** *Curso de física teórica: Teoría clásica de los campos*. s.l. : Reverté. 2ª edición.
- libre, Código**. *Código de programación controladora Multiwii 2.4*.
- López Alba, Elías, Almazán Lázaro, Juan Antonio y Diaz Garrido, Francisco A.** 2013. *II Premio Castillo de Canena de Investigación Oleícola*. . s.l. : Castillo deCanena, 2013.
- López Alba, Elías, y otros**. *Dispositivo para la aplicación de productos fitosanitarios*.
- Materials, Advent Research**. <http://www.advent-rm.com/>. [En línea]
- McDaid, Hugh y Oliver, David**. 1997. *Robot Warriors. The Top Secret History of the Pilotless Plane*. s.l. : Orion Media, 1997.
- Meacock**. 1947. *Aircraft Propeller Design*. Edgware : SPON, 1947.
- Medina, Patricio Bohorquez de**. 2016. *Apuntes asignatura Simulación de Flujos Industriales*. 2016.
- Miller, Graham, Faerber, Ludwig y Winkler, Christian**. Brushless Gimbal. Worldwide first Open Source Brushlessgimbal Controller. s.l. : Brushlessgimbal.de.
- Muñoz Torralbo, Manuel y Payri González, Francisco**. 2005. *Máquinas térmicas*. Madrid : UNED, 2005. Tomo 1.
- NASA**. <http://mynasadata.larc.nasa.gov/science-practices/electromagnetic-diagram/>. [En línea]
- Nieto Torres, Álvaro**. 1999. *Telecomunicaciones y telemática, de las señales de humo a Internet*. s.l. : Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.
- Online, RS**. <http://es.rs-online.com/web/>. [En línea]
- Parkinson, Bradford W**. 1996. *Global Positioning System: Theory and Applications Vol 1*. s.l. : AIAA, 1996.
- Peragón, Fernando Cruz**. *Apuntes de Máquinas Térmicas*.
- Piqueras, Pedro, y otros**. *Ejercicios Resueltos de Motores a Reacción y Turbinas de Gas*. s.l. : UPV.
- Plástico, Andaltec. Centro tecnológico del**. <http://www.andaltec.org/>. [En línea]
- Post- Afghanistan Era. International, Armada**. 2014. 2014, UAV compendium.
- Pump, Water**. <http://cnseaflo.en.made-in-china.com/product/HBCmxPclgzkl/China-SeaFlo-12V-DC-5-0L-Min-100psi-Small-Electric-High-Flow-Marine-Sea-Water-Pump.html>. [En línea]
- Quadcopter. Edge, Sociall**.
- QX-Motor**. *Ducted Fan Brushless Motor*.
- Scheme, Open BLDC PWM**. <https://www.youtube.com/watch?v=mXXplxLOX2U>. [En línea]
- series, Emax BHeli**. [En línea]
- Sprayer., FH-8Z-10 UAV. Drone Crop**. <http://www.ecigmanual.com/products-search/pz687490a-cz5d7048d-fh-8z-10-remote-control-unmanned-helicopter-uav-agricultural-spraying.html>. [En línea]
- Technology, Plastic**. <http://www.ptonline.com/>. [En línea]
- The 'Aerial Target' and 'Aerial Torpedo' in Britain*. **RPAV, Remote Piloted Aerial Vehicles**. Aviation and Aeromodelling.

Theory, Three Phase AC Motor. www.nfphampden.com. [En línea]
ToolBox, The Engineering. http://www.engineeringtoolbox.com/awg-wire-gauge-d_731.html. [En línea]
TowerPro. Servos.
Turnigy. *Manual for Brushless Motor Speed Controller.*
Understandig jet noise. **Karabasov, S.A. 2010.** 2010, royal society.
Usuarios, CAD-Cam. 2015. *Curso de superficies avanzadas con Catia V5.* Jaén : s.n., 2015.
Vázquez, Jesús. 2003. *Aplicación de productos fitosanitarios. Técnicas y equipos.* Madrid : Agrotécnicas, S.L, 2003.
Vehicles, Agriculture Unmanned Aerial.
http://www.uavcropdustersprayers.com/hercules_uav.htm. [En línea]
Webinar. *Rotorcraft UAV Modeling Using Advanced Simulation Tool.* STAR-CCM+ : CD-Adapco.
Zaloga, Steven J. *Unmanned Aerial Vehicles: Robotic Air Warfare.* s.l. : Osprey.