



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE
CATALUNYA

**Diseño de un dron con pila de hidrógeno para
transporte de paquetería - Pliego de condiciones**

Trabajo de final de máster

Curso 2020-21

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Director: **Salueña Berna, Xavier**

Autor: **Flores Navarro, César**

Fecha de entrega: **26 de Abril de 2021**

Índice

	Página
1. Introducción al pliego de condiciones	1
2. Disposiciones generales	1
3. Condiciones administrativas	3
4. Condiciones técnicas	5
5. Condiciones de equipamiento y materiales	6
6. Condiciones económicas	7
7. Condiciones legales	8
8. Condiciones de seguridad y medioambientales	10

1. Introducció al pliego de condiciones

El presente documento pretende identificar, enumerar y regular las condiciones, tanto generales como específicas, del proyecto al que hace referencia. Mientras el pliego de condiciones generales contiene una descripción genérica del contenido del proyecto y sus características, las partes específicas de éste incluyen aspectos más concretos como las bases legales, económicas, de equipamiento o de seguridad que deberán cumplirse en la ejecución del diseño. Así pues, éste complementa al resto de documentos presentados y expone todas las cláusulas y condiciones que se aceptan al realizar dicho plan de trabajo. Resulta por lo tanto un documento imprescindible en todo proyecto técnico, sobretodo de cara a futuras relaciones entre propietario/s del diseño y agentes externos o contratistas que continúen trabajando con los resultados obtenidos.

2. Disposiciones generales

Este proyecto de diseño de un dron con pila de hidrógeno para transporte de paquetería consiste en elaborar un diseño preliminar tridimensional mediante software de la estructura de la aeronave no tripulada, además de determinar la adecuada colocación y sujeción de la carga de peso de hasta 10kg de forma que no se comprometa su estabilidad ni centro de gravedad. El propósito final es lograr alcanzar un prototipo o diseño preliminar que pueda ser construido y analizado en detalle en futuras etapas desarrolladas por otros estudiantes, pudiendo finalmente ser una aeronave operativa para transporte de mercancías en rutas de larga distancia a medio y largo plazo.

Asimismo, el conjunto de componentes electrónicos presentes en el dron son escogidos con tal de determinar la masa total de la aeronave y el coste asociado, lo cual influye de forma directa en el dimensionamiento de las hélices o elementos sustentadores. Utilizando las ecuaciones dinámicas que gobiernan el tipo de aeronave escogida para el dron, en este caso un autogiro, se pueden calcular las dimensiones necesarias de sus hélices y superficies estabilizadoras y de control direccional, y hallar posibles opciones comerciales de proveedores de piezas aeronáuticas. Por lo que respecta a la fuente de combustible, se

trata en este caso de una pila de combustible de hidrógeno, lo cual permite una reducción importante en emisiones y contaminación con respecto a motores convencionales y una alternativa recargable y duradera a las baterías de litio.

El prototipo preliminar ha sido diseñado desde cero, basando la elección del tipo de aeronave en las características, ventajas e inconvenientes de las diversas posibilidades al alcance, además de buscar la innovación en caminos poco explotados en el mundo de los RPA. El conjunto de proyectos presentes en la actualidad en el ámbito civil, así como las legislaciones vigentes en nuestro país, determinan de forma importante el diseño del dron y configuran aspectos técnicos como su identificación o la altura de vuelo de crucero que deberá llevar en los viajes de transporte de paquetería. En cuanto a los materiales estructurales de la aeronave, éstos se han elegido según las necesidades de resistencia de cada parte en concreto, aunque primando también la baja densidad y el mínimo impacto económico posible.

El desarrollo del proyecto se encuentra detallado en los documentos principales de este diseño, siendo éstos la memoria, los anexos y los planos. La viabilidad del conjunto del proyecto y su ejecución en futuras etapas viene determinada por todos los estudios llevados a cabo en dichos documentos, permitiendo obtener una idea general de si se trata de una idea factible a corto o medio plazo.

3. Condiciones administrativas

Se ha desglosado este proyecto en 5 documentos distintos, donde se incluyen aspectos cruciales y diferenciados con tal de poder llevarlo a cabo. A continuación se enumeran dichos documentos y se especifica a grosso modo la información que puede encontrarse en cada uno de ellos:

- **Memoria:** Ésta consta de una breve introducción del proyecto y de los objetivos marcados, el alcance que tendrá y la justificación de ser de la propia idea de trabajo. Le siguen un estado del arte que incluye los distintos tipos principales de drones disponibles, así como proyectos comerciales existentes en la actualidad sobre transporte de paquetería mediante RPAs y/o incorporación de pilas de combustible de hidrógeno. Finalmente se muestran los resultados del proceso de diseño, incluyendo el diseño tridimensional estructural preliminar del dron mediante software y la disposición de la carga de pago y los componentes electrónicos necesarios para su funcionamiento, así como el dimensionamiento de sus elementos sustentadores y estabilizadores mediante las ecuaciones que rigen su vuelo.
- **Anexos:** En ellos se incluye información extra sobre el diseño preliminar de la aeronave, tratándose de breves análisis comerciales y fragmentos de código para cálculos analíticos usados de cara al dimensionamiento de las hélices y superficies estabilizadoras. Por otro lado se incluye también el conjunto de documentación técnica referente a los componentes seleccionados para la aeronave.
- **Planos:** El documento de planos incluye todos los planos 2D del diseño estructural preliminar tridimensional llevado a cabo mediante el software *SolidWorks*. De esta forma, éste se analiza desde todas las vistas necesarias mediante su dimensionado generalista, a nivel conceptual y no constructivo, representando las medidas que definen cada parte del dron con tal de que puedan ser interpretadas correctamente.
- **Pliego de condiciones:** El documento de pliego de condiciones especifica todo tipo de condiciones, tanto genéricas como específicas, acerca de aspectos administrativos, legales, técnicos o económicos que deben tenerse en consideración a lo largo de la realización del proyecto. También se especifican aquí ciertas características del prototipo diseñado.

- **Presupuesto:** En el documento presupuestario se ofrece el cálculo de los costes que implica la realización del proyecto. En dichos costes se incluye, de forma desglosada: el precio de los componentes electrónicos presentes, la pila de combustible, tanque y motor seleccionados, los materiales estructurales de cada parte de la aeronave y las horas de trabajo del ingeniero encargado del proyecto, que se deberán remunerar al precio estipulado. De forma complementaria también se consideran los recursos energéticos empleados y un pequeño presupuesto de contingencia para paliar posibles inconvenientes.

4. Condiciones técnicas

Se ha llevado a cabo el proyecto procurando diseñar una aeronave no tripulada de dimensiones coherentes para la misión encomendada y la idea que representa un dron. El dimensionado de sus superficies sustentadoras y la elección de la fuente energética han sido en todo momento pensadas para rutas de media y larga distancia, ofreciendo una alternativa viable técnicamente hablando para el transporte de paquetería por aire empleando RPAs prácticamente autónomos. El hecho de haber obtenido un dron de una masa ligeramente superior a la que suele ser habitual (al acarrear una carga de pago sustancialmente más pesada) no supone ningún problema, al haber adaptado los requerimientos energéticos y de potencia semejante problemática. Sin embargo, este dron presenta limitaciones asociadas a la técnica, presentes en la necesidad de un espacio determinado (una pista o espacio abierto similar) para ejecutar las operaciones de despegue y aterrizaje durante las rutas. Por otra parte, se necesita de estaciones de recarga intermedia a diseñar en proyectos paralelos a este, además de un estudio a fondo de la potencia seleccionada y del impacto de las altas revoluciones del rotor obtenidas en el apartado de cálculos de la memoria.

De cara a las condiciones técnicas a aplicar en futuras ampliaciones del proyecto, primeramente se deberá llevar a cabo un diseño completo del conjunto de características de la aeronave. Para su fabricación es necesario un prototipo tridimensional de dimensiones constructivas con cotas y tolerancias establecidas. Mediante un estudio aerodinámico completo puede determinarse la potencia requerida para poner el aparato en movimiento, pudiendo variar las elecciones energéticas frente a las mostradas aquí. Estudios mecánicos asociados permitirán determinar la estabilidad e integridad de la estructura, pudiéndose realizar mediante software empleando el método de elementos finitos o similar. La compleja forma de los materiales podrá ser generada a partir de impresión 3D (para el ABS del tren de aterrizaje) o moldeado simple (para la fibra de carbono de la carcasa, chasis y parte de la cola). El estudio de las uniones estructurales y sujeciones entre elementos deberá acompañar a los estudios mecánicos. Finalmente, previo a las pruebas de vuelo se necesitará hacer una serie de comprobaciones de funcionamiento en presencia de operarios cualificados, para asegurar así el correcto desempeño de motores y elementos móviles como la hélice frontal y el rotor.

5. Condiciones de equipamiento y materiales

El conjunto de **materiales** seleccionados para el proyecto deben de cumplir las especificaciones mostradas en el documento principal de este proyecto. Las propiedades físicas deberán estar en concordancia con lo establecido para poder llevar a cabo la construcción del dron de forma coherente con el diseño conceptual ya realizado. Se requerirá de un estudio estructural de la aeronave, previa a su construcción mediante software (como por ejemplo, usando el método de elementos finitos) o después de haber sido construida, para garantizar así su funcionalidad estructural.

Por lo que respecta al equipamiento seleccionado, en futuras etapas deberá mantenerse de forma crucial el tipo de **pila de combustible** escogida (de hidrógeno y tipo PEM), aunque podrá ser sustituida por otro modelo de mayor potencia si así lo determinan futuros estudios aerodinámicos o de diversa índole. También se deberá mantener la idea de un tanque acumulador de hidrógeno a bordo del dron, así como un motor eléctrico. Ambos podrán ser seleccionados de nuevo para concordar en términos de potencia con una posible nueva pila de combustible. Tanto en el documento de la memoria como en el **Anexo C** del documento de **Anexos** se pueden encontrar de forma detallada las consideraciones tomadas para la elección de dichos elementos, así como sus características.

El conjunto de **componentes electrónicos** enumerados en memoria y anexos ha sido escogido de forma arbitraria para dotar al proyecto de un carácter más realista en términos de masa total de la aeronave y coste asociado. Éstos podrán ser sustituidos por otros similares en caso de necesidad, si un estudio de la circuitería electrónica así lo determina. Se pueden consultar las características principales de dichos componentes en el **Anexo B** del documento de **Anexos**, así como sus fichas técnicas en el **Anexo E** del mismo.

Para poder llevar a cabo este proyecto, así como iniciar posibles continuaciones futuras, se requiere de un ordenador con las siguientes características:

- Sistema operativo *Windows*, ya sea nativo, partición de disco o máquina virtual.
- Programa de edición de código *Matlab*, versión 2020 o similar, con la licencia que comporta.
- Programa de diseño tridimensional *SolidWorks* 2020 o posterior, con la licencia que comporta.
- Posibles softwares de planificación de rutas de aeronaves no tripuladas para futuros avances del proyecto, como *QGroundControl*, *MissionPlanner* y *ArduPilot*.

6. Condiciones económicas

El diseño del dron ha sido planificado en todo momento intentando suponer el menor coste posible. El presupuesto elaborado se encuentra detallado en el documento adjunto de **Presupuesto**, y se divide en: recursos humanos remunerados para la realización de este proyecto, coste de materiales estructurales, coste de componentes electrónicos, pila de combustible, tanque y motor, coste de los recursos energéticos empleados durante las horas de trabajo y presupuesto de contingencia. El presupuesto definitivo resulta de la suma simple de todas estas cantidades, donde ya se considera aplicado el 21 % de IVA aplicable a todos los materiales, consumo energético y componentes a los cuales se pueda aplicar este impuesto.

Por supuesto, se trata de un presupuesto orientativo para dar una idea a nivel conceptual de lo que puede costar diseñar semejante aeronave, y no incluye costes de fabricación o construcción, ensamblaje de piezas, nuevos estudios y testeados ni el coste de recursos humanos destinados a futuras ampliaciones de este trabajo.

7. Condiciones legales

Durante la realización de este proyecto se ha debido prestar especial atención a la normativa y regulaciones vigentes en España, las cuales afectan de forma directa al diseño del prototipo de dron preliminar desarrollado. En particular, se ha analizado de forma más importante el **Real Decreto 1036/2017**, que entró en vigor el 29 de diciembre de 2017 y regula concretamente la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto. Además, todo tipo de aspectos secundarios deben considerarse, según si ésta supera o no ciertas categorías de masa (como por ejemplo, el límite de 25kg de cara a su matriculación), su método de pilotaje... Dichas normativas serán especialmente importantes de cara a futuras fases de este proyecto, en su construcción y debidas pruebas de vuelo.

De esta forma, se recoge a continuación el conjunto de normativas más importantes (aunque no las únicas, tal y como se explica en el documento de la memoria):

- **Real Decreto 1036/2017**, del 15 de diciembre, que modifica el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio. Se trata de la definición más actualizada de las características que deben cumplir las aeronaves no tripuladas para poder ejercitar legalmente en el espacio aéreo español, siendo la más importante al afectar directamente al diseño del dron. Regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, estableciendo el marco jurídico definitivo aplicable a la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) de masa máxima de despegue inferior a los 150 kg.
- Reglamentos Europeo y Delegado (UE) **2019/947** **2019/945** de la comisión de 12 de marzo de 2019 sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas. Son actualizados en el Reglamento de Ejecución **2020/746** para ajustar las fechas de su aplicación de forma adecuada al contexto de la pandemia de la COVID-19. Se trata de una normativa actualizada a nivel europeo que, a pesar de ya haber sido aprobada, no entrará en vigor hasta el 1 de enero de 2022. Sustituirá a la normativa estatal vigente en el momento actual y planteará un conjunto de escenarios de operaciones de drones mucho más amplio y de forma más permisiva. Gracias a esta actualización de la normativa

sobre aeronaves no tripuladas se establece una viabilidad legal para implementar de forma práctica, en un futuro, el diseño llevado a cabo en este proyecto.

De forma complementaria, se debe prestar atención también a las normativas siguientes:

- Disposición 2087 del BOE. Resolución de 8 de enero de 2020, de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, por la que se publican los medios aceptables de cumplimiento y material guía, aprobados para las operaciones con aeronaves pilotadas por control remoto, en virtud del Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre.
- **Ley 48/1960**, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea. Regula los procedimientos de identificación de las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) mediante su designación específica en una placa ignífuga, según si su masa supera o no los 25kg (artículos 29 y 36). También informa sobre los requisitos de inscripción en el Registro de Matrícula de Aeronaves Civiles y la obtención del certificado de aeronavegabilidad previstos, respectivamente, en los artículos 29 y 36.
- Ley 18/2014 del 15 de octubre. Recoge el conjunto de medidas urgentes a tomar para favorecer el crecimiento, la competitividad y la eficiencia mediante el auge del transporte de paquetería contemplando el uso de aeronaves no tripuladas.

Tal y como se puede observar tanto en la **Memoria** del proyecto como en el **Anexo A** del documento adjunto de **Anexos**, se ha llevado a cabo un detallado resumen acerca de las regulaciones que afectan al diseño de la aeronave, determinando una serie de aspectos que afectan al diseño del dron de manera directa.

Para cualquier aspecto legal relacionado con el tratamiento de los datos de este proyecto, ya sea para su uso o su continuación, se deberá comunicar y referir al **autor** del mismo o, en su defecto, a la **Universidad Politécnica de Cataluña** para autorizar el permiso de su manipulación.

8. Condiciones de seguridad y medioambientales

Se ha procurado llevar a cabo el diseño del dron teniendo en cuenta los factores de seguridad asociados, ya que aunque se trate de una fase conceptual preliminar de la fabricación de una aeronave este factor debe ser ya considerado. De aquí en adelante, será imprescindible cumplir cualquier normativa que atañe a la seguridad operacional de este RPA, así como prestar atención a las actualizaciones periódicas de la normativa que regulan este aspecto. Sobretudo será necesario considerar un método de garantizar la seguridad e integridad, tanto del propio dron como de las personas y estructuras que sobrevuela, al estar éste operando sobre áreas pobladas, rurales o urbanas. En caso de fallo motor, fallo de los componentes electrónicos o si la integridad estructural de la aeronave se ve comprometida, se deberá diseñar un plan de contención para evitar daños materiales y personales, haciendo que aterrice de forma inmediata.

En el aspecto medioambiental, se ha incorporado una pila de combustible de hidrógeno que únicamente expelle a la atmósfera vapor de agua e hidrógeno en una proporción muy pequeña. Esto supone una mejora medioambiental con respecto a motores de combustión y una mejora de autonomía con respecto a baterías eléctricas convencionales. Sin embargo, de cara a la fabricación y futura comercialización del dron será necesario presentar un informe detallando las emisiones generadas por la fuente energética, así como evaluar la huella de carbono derivada de la obtención del combustible. Por otro lado, el proceso de gestión de residuos y reciclado de pila, componentes y demás materiales deberá ser establecido si se desea producir en serie unidades derivadas de este diseño.