



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



TRABAJO FIN DE GRADO

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

DEFINICIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL  
PROTOCOLO DE SEGURIDAD OPERACIONAL PARA  
EL CONTROL DE CALIDAD EN GRANDES  
AEROGENERADORES CON RPAS.



GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

Elaborado por Fermín Legaz Martínez

Supervisado por:

Juan Antonio García Manrique

# Índice

1. Introducción.....	1
2. Descripción de la operación.....	2
2.1. Características de la aeronave.....	2
2.2. Normativa aplicable.....	3
2.3. Personas intervinientes.....	5
3. Zona de vuelo.....	7
4. Relación de riesgos.....	9
4.1. Probabilidad de que suceda un accidente.....	9
4.2. Severidad de los peligros enumerados.....	14
4.3. Riesgo de las operaciones e índice de riesgo.....	18
5. Medidas técnicas de prevención y protecciones.....	20
6. Cuestionario de seguridad para la aeronave y su equipo de control.....	22
7. Aerogeneradores.....	24
7.1. Definición.....	24
7.2. Funcionamiento.....	24
7.3. Componentes de un aerogenerador.....	25
7.4. Palas.....	28
7.4.1. Fabricación.....	28
7.4.2. Ensayos realizados a las palas.....	29
7.5. Principales averías y daños.....	30
7.5.1. Pequeñas averías.....	30
7.5.1.1. Alarmas eléctricas.....	30
7.5.1.1.1. Equipo de maniobra.....	31
7.5.1.1.2. Protección de rayos.....	32
7.5.1.1.3. Motores o ventiladores.....	32
7.5.1.1.4. Electrónica de control y potencia.....	33
7.5.1.2. Mecánico/hidráulicos.....	33
7.5.1.2.1. Hidráulicas.....	33
7.5.1.2.2. Conexionado y sellado.....	34
7.5.1.2.3. Oxidación y acumulación de insectos.....	34
7.5.1.2.4. Presencia de aire en el aceite.....	35

<b>7.5.2. Grandes averías</b> .....	36
<b>7.5.2.1. Eléctricas</b> .....	36
<b>7.5.2.2. Mecánicas</b> .....	36
<b>8. Instrucciones para el piloto</b> .....	39
<b>9. Procedimiento a seguir para hacer un estudio de los defectos en las palas de un aerogenerador.</b> .....	40
<b>10. Conclusiones.</b> .....	43
<b>11. Bibliografía.</b> .....	44

## Índice de figuras

---

2.1. Dron DJI Matrice 200 TDK.....	2
2.2. Dron realizando verificación de palas de aerogenerador.....	3
2.3. Dron pilotado por equipo técnico especializado.....	6
3.1. Localización de los diferentes aeródromos.....	7
3.2. Zona de vuelo (color verde), zona de aterrizajes y despegues (color rojo) y zona de la tripulación (color naranja).....	7
3.3. Carta de aproximación visual.....	8
7.1. Aerogenerador de empresa española de promoción y gestión de infraestructuras y energías renovables ACCIONA.....	24
7.2. Partes principales de un aerogenerador.....	25
7.3. Disposición del rotor respecto a la dirección del viento incidente.....	26
7.4. Pala de aerogenerador.....	28
7.5. Proceso de fabricación de una pala.....	28
7.6. Vista termográfica de aerogenerador.....	30
7.7. Equipo eléctrico quemado.....	31
7.8. Termografía de un equipo eléctrico.....	32
7.9. Rayo en un aerogenerador.....	32
7.10. Manguito degradado.....	33
7.11. Óxido en partes de un aerogenerador.....	35
7.12. Pala con restos de insectos y erosión con oxidación en superficie.....	35
7.13. Presencia de aire en el aceite.....	36
7.14. Degradación de ruedas dentadas.....	37
7.15. Daños provocados por un rayo.....	37

## Índice de tablas

---

1	Valores del índice de riesgo.....	18
2	Resumen probabilidad, severidad y riesgo de los posibles peligros estudiados.....	19
3	Principales averías mecánicas y sus posibles causas.....	37
4	Datos de inspección.....	40
5	Estudio de los defectos de un aerogenerador.....	41

# 1. Introducción

---

En el presente trabajo se pretende realizar un estudio de seguridad donde se analizará el nivel de seguridad en materia de vuelos para la investigación con drones, con el objeto de verificar la seguridad en las soldaduras y detectar grietas u otros defectos de las palas de los aerogeneradores, pues la detección precoz de los daños servirá para prolongar la vida útil de los aerogeneradores, utilizando para ello el dron DJI Matrice 200.

Mediante la inspección de aerogeneradores con drones se consigue sustituir a la técnica anterior, en la que numerosos operarios se colgaban del aerogenerador en el aire sujetos por unas cuerdas, la cual es un tanto peligrosa. Empleando este tipo de aeronaves se conseguirá elaborar un plan de mantenimiento de los aerogeneradores, con una serie de ventajas como el tiempo, el dinero y la seguridad, ya que con esta inspección se consigue minimizar el tiempo de parada del aerogenerador lo que se traduce en beneficios, ya que cada instante de tiempo que esté parado son pérdidas y se necesitará mucho menos personal, además que es una operación mucho más segura ya que no ponemos en riesgo prácticamente nada como se evaluará en siguientes apartados.

Para ello, la empresa suministradora de energía o titular del parque eólico da las explicaciones oportunas a la operadora, sobre lo que quiere que se inspeccione por motivos de seguridad, así como un chequeo principal del aerogenerador a nivel externo. Así, la operadora asignará a un piloto que se encuentra capacitado mediante el curso debidamente homologado por una ATO (Approved Training Organization) que son escuelas que imparten cursos para obtener el título de piloto de drones certificadas por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA). La operadora entregará al piloto el protocolo de seguridad operacional y las instrucciones a seguir para el control de calidad en aerogeneradores, que será la principal tarea a desarrollar en el presente trabajo. Una vez el piloto realiza la inspección, la operadora entregará al cliente el vídeo o imágenes obtenidas para que bien él u otra empresa realice el plan de mantenimiento oportuno de los aerogeneradores con el principal fin de maximizar beneficios. Tanto la operadora como la ATO cumplen con la normativa vigente de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), que a su vez cumple la Ley 18/2014 y ésta el Real Decreto-ley 48/1960 sobre navegación aérea.

En primer lugar, señalar que un dron es un vehículo aéreo no tripulado y que puede ser controlado en forma remota; puede ser usado en infinidad de tareas que el humano no puede o no quiere realizar, o simplemente son demasiado peligrosas, como por ejemplo, la exploración o la limpieza de residuos tóxicos, y como no podía ser de otro modo, para fines bélicos.

Antes de continuar, indicar que un aerogenerador es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las palas de un aerogenerador giran entre 13 y 20 revoluciones por minuto, según su tecnología, a velocidad constante o variable, donde la velocidad del rotor varía en función de la velocidad del viento para alcanzar una mayor eficiencia.

La energía eólica es en España una de las más importantes energías renovables, albergando cada vez más, mayor número de aerogeneradores en parques eólicos, buscando alternativas a la energía nuclear y otras energías que puede provocar un grave daño a la atmósfera, de ahí que cada vez se diseñan las palas de los aerogeneradores con una mayor aleación.

Un parque eólico es una agrupación de aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica, el número de éstos es muy variable ya que depende de la superficie disponible y de las características del viento, previamente estudiado durante más de un año para conocer las direcciones predominantes del viento y su velocidad.

## 2. Descripción de la operación

---

### 2.1. Características de la aeronave

---

Para llevar a cabo esta operación utilizaremos el dron DJI Matrice 200 TDK



**Figura 2.1.-** Dron DJI Matrice 200 TDK

La utilización de este dron se debe a la gran precisión de esta aeronave, gracias a una estabilidad de vuelo en condiciones de vientos fuertes mejorada, los inspectores de aerogeneradores pueden encontrar daños milimétricos en cualquier parte de las hélices de la turbina, gracias a éste tipo de dron, que cuenta con un motor de alto rendimiento, unido a unas hélices de 17 pulgadas, aseguran un vuelo estable en vientos de velocidades de hasta 35 km/h. El nuevo sistema de batería dual calienta las baterías automáticamente en vuelos a temperaturas bajo cero, a la vez que un diseño bien aislado asegurando su resistencia al agua y al clima, para poder volar en todo tipo de entornos.

El dron, DJI Matrice 200 TDK, además es compatible con las nuevas cámaras con Gimbal de DJI, termal, con zoom, y de alta resolución, aunque generalmente se emplearán cámaras del modelo Zenmuse. Sus dimensiones son 716 x 220 x 236 milímetros, con un peso sin carga de 3.80kg. El DJI Matrice 200 TDK cuenta con certificación IP43, lo cual significa que el dron puede ser expuesto a la lluvia y hasta la nieve, esto no significa que el dron puede ser sumergido en el agua, es una protección contra condiciones climáticas que suceden mientras estamos en vuelo y nos permite regresar con nuestro dron a salvo. Adicional y teniendo en cuenta su uso industrial cuenta con protección contra interferencia electromagnética.

Otra característica de este dron es que transmite en tiempo real su posición de vuelo, lo cual es una gran avance pensado en la seguridad aérea, permitiendo que todos los aviones de uso comercial sepan de que hay un dron cerca. También cuenta con una cámara para que los pilotos puedan tener una vista frontal del dron en tiempo real para navegar de manera confiable por ambientes complejos.



**Figura 2.2.-** Dron realizando verificación de palas de aerogenerador.

## **2.2. Normativa aplicable**

---

Las características del sector de las aeronaves pilotadas por control remoto hacen que formular una regulación para el mismo sea una tarea compleja, debido a las diferentes características, componentes y prestaciones, que se pueden encontrar en el mercado, además el tamaño puede variar de unos pocos centímetros hasta varios metros con diferentes velocidades y tipos de desplazamiento.

Como se indicó en el apartado anterior, tanto la operadora como la escuela de pilotos deben cumplir la normativa de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, AESA, que es el organismo del Estado que vela para que se cumplan las normas de aviación civil en el conjunto de la actividad aeronáutica de España. Esta agencia cumple con la Ley 48/1960, de 21 de julio, de navegación aérea que regula la navegación aérea tanto civil como militar en España.

Los pilotos y operadores de RPAS, en tanto que usuarios del espacio aéreo, tienen la obligación de conocer y respetar los preceptos que conforman esta ley. A continuación se comentan los artículos que resultan de interés para nuestra operación.

**Artículo cuatro.** Se reconoce el derecho de los dueños u ocupantes de los bienes subyacentes a ser resarcidos conforme a los capítulos IX y XIII de la presente ley, la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, los tratados internacionales y el Derecho Comunitario, de los daños y perjuicios que se les ocasionen como consecuencia de su deber de soportar la navegación aérea. Los operadores de RPAS son responsables de los daños y perjuicios que ocasionen durante sus operaciones.

**Artículo once.** Se entiende por aeronave cualquier máquina pilotada por control remoto que pueda sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra. Los RPAS son aeronaves y por tanto, están sometidos al derecho aeronáutico. La regulación de las operaciones con aeronaves pilotadas por control remoto, cuya masa esté por debajo de 150 kg, corresponde a cada país miembro de la Unión Europea. Se requiere que estas aeronaves deban ser pilotadas por control remoto, es decir, que un piloto en tierra controle la aeronave.

**Artículo veinte.** Las aeronaves llevarán a bordo los siguientes documentos:

- Certificación de matrícula en la que constará el título de propiedad.
- Certificado de aeronavegabilidad.
- Licencia de aptitud de cada uno de los tripulantes.
- Cuando lleve pasajeros o carga, lista de los nombres de los pasajeros y lugares de embarque y puntos de destino y manifiesto y declaración de carga.
- Cualquier otro documento que reglamentariamente pueda exigirse. En el caso de los RPAS, podría ser deseable que estuviera siempre disponibles para el piloto al mando, el apéndice B.1 ó B.2 (medios aceptables de cumplimiento) según el escenario operativo de que se trate y el recibo de la póliza de seguro de responsabilidad civil.

**Artículo veintidós.** El cuaderno de la aeronave, la cartilla de motores y la de hélices, en su caso, se mantendrán al día en lugar seguro y a disposición de las Autoridades que puedan requerirlos. En caso de que la información contenida en estos documentos quede registrada en otra documentación obligatoria, no será necesario que se disponga de ellos.

**Artículo veintitrés.** Las aeronaves llevarán visibles al exterior las marcas de nacionalidad y matrícula que se establezcan, y en lugar visible, ya sea en su interior o en el exterior, una placa con indicación del tipo, número de la serie y de matrícula, así como el nombre del propietario. Como se verá al tratar la regulación específica de las operaciones con RPAS, la aeronave debe portar una placa de identificación, que permita diferenciarla de manera inequívoca y conocer a su propietario.

**Artículo veinticuatro.** Los libros de la aeronave se conservarán por el propietario durante dos años, a partir de la fecha del último asiento. Es necesario tener actualizados y custodiar adecuadamente los libros registro de mantenimiento de los RPAS, proporcionado por el fabricante u operador.

**Artículo cincuenta y cinco.** El personal afecto a la navegación aérea puede ser de vuelo y de tierra.

**Artículo cincuenta y seis.** El personal de vuelo es el destinado al mando, pilotaje o servicio de a bordo de la aeronave y que constituye su tripulación. La expedición de sus títulos aeronáuticos corresponde privativamente al Ministerio de Fomento, en las condiciones que reglamentariamente determine.

**Artículo cincuenta y siete.** El personal de tierra comprende a los directivos, técnicos y auxiliares de aeropuerto, aeródromo e instalaciones que apoyen directamente a la navegación aérea. A la hora de fijar los roles y asignar tareas, en el caso de los RPAS hay que tener en cuenta que, la tripulación se encuentra también en tierra.

**Artículo cincuenta y nueve.** El Comandante de la aeronave es la persona designada por el empresario para ejercer el mando. Podrá acceder al puesto de Comandante cualquier ciudadano que tenga la nacionalidad de un Estado miembro de la Unión Europea y se halle en pleno disfrute de sus derechos civiles y en posesión del título de Piloto y licencia de aptitud correspondiente al tipo de aeronave utilizada. En las aeronaves de transporte la edad mínima para el desempeño de tal cometido será la de veinticinco años.

**Artículo ciento diecinueve.** Son indemnizables los daños que se causen a las personas o a las cosas que se encuentren en la superficie terrestre por acción de la aeronave, en vuelo o en tierra, o por cuanto de ella se desprenda o arroje.

**Artículo ciento veinte.** La razón de indemnizar tiene su base objetiva en el accidente o daño y procederá, hasta los límites de responsabilidad que en este capítulo se establecen, en cualquier supuesto, incluso en el de accidente fortuito y aun cuando el transportista, operador o sus empleados justifiquen que obraron con la debida diligencia.

**Artículo ciento veintidós.** Si la persona que utiliza la aeronave lo hiciese sin el consentimiento del transportista o propietario, responderá aquélla ilimitadamente de los daños, y éste subsidiariamente, con los límites establecidos en este capítulo, si no se demuestra que le fue imposible impedir el uso ilícito. Los operadores de RPAS deben adoptar las medidas necesarias para evitar el acceso no autorizado a los sistemas (actos de interferencia ilícita), puesto que pueden ser responsables subsidiarios de los daños que pueda causar la persona que utilice la aeronave.

**Artículo ciento veintiséis.** Los seguros aéreos tienen por objeto garantizar los riesgos propios de la navegación que afectan a la aeronave, mercancías, pasajeros y flete, así como las responsabilidades derivadas de los daños causados a tercero por la aeronave en tierra o vuelo.

Añadir que antes era exigible la previa autorización de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea para las operaciones con RPAS, hasta que se publicó la Resolución de la directora de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea en Julio de 2014, por la que se adoptaron medios aceptables de cumplimiento y material guía para la emisión de títulos habilitantes para esas operaciones. El Consejo de Ministros del día 4 ese mes aprobó el Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, que salió publicado en el B.O.E. al día siguiente (5 de julio de 2015). Esta regulación se tramitó como ley durante los meses siguientes, proceso que terminó con la publicación en el B.O.E. del viernes, 17 de octubre de 2014, de la Ley 18/2014, de 15 de octubre. El reglamento temporal para los trabajos aéreos y otras actividades aéreas con RPAS se recoge en la Sección 6ª: Aeronaves civiles pilotadas por control remoto. A continuación se indica el artículo 50 de dicha ley ya que principalmente es el que nos afecta para nuestra operación.

**Artículo cincuenta.** Operación de aeronaves civiles pilotadas por control remoto.

Hasta tanto se produzca la entrada en vigor de la norma reglamentaria prevista en la Disposición final segunda, apartado 2, de esta Ley, las operaciones de aeronaves civiles pilotadas por control remoto quedan sujetas a lo establecido en este artículo. El cumplimiento de lo dispuesto en este artículo no exime al operador, que es, en todo caso, el responsable de la aeronave y de la operación, del cumplimiento del resto de la normativa aplicable, en particular en relación con el uso del espectro radioeléctrico, la protección de datos o la toma de imágenes aéreas, ni de su responsabilidad por los daños causados por la operación o la aeronave

### **2.3. Personas intervinientes**

---

Los pilotos que van a realizar la operación de vuelo, se encuentran formados por la Universidad Politécnica de Valencia, que han seguido la normativa definida por la AESA. Estos poseen el Diploma de Extensión Universitaria en Pilotaje en Sistemas de Aeronaves Tripuladas por Control Remoto (RPAS), los cuales se encuentran dotados de diploma que acredita la formación en conocimientos generales así como Principios de Vuelo, Navegación, Comunicaciones, Procedimientos Operacionales, Derecho Aéreo, Meteorología, Factores Humanos. Los pilotos serán capaces de gestionar y pilotar las aeronaves RPAS antes, durante y después del vuelo. Con formación en prácticas de vuelo en simulador (básico y avanzado). Así mismo y además de lo

anterior, los pilotos están certificados para realizar los correspondientes vuelos con el dron DJI Matrice 200 TDK, sobre el espacio aéreo que comprenderá la inspección de los aerogeneradores del parque eólico, por la ATO Real Aeroclub de Valencia.



**Figura 2.3.-** Dron pilotado por equipo técnico especializado

La tecnología de RPAS (Sistemas Aéreos Remotamente Tripulados), más conocidos como drones, permitirá identificar los defectos presente en las palas de los generadores eólicos, a través de fotografía o vídeo. La inspección se realizará con una cámara de alta resolución, que ofrece imágenes en espectro visible, o bien con una cámara termográfica siendo ésta un dispositivo que, a partir de las emisiones de infrarrojos medios del espectro electromagnético de los cuerpos detectados, forma imágenes luminosas visibles por el ojo humano. Estas cámaras operan, más concretamente, con longitudes de onda en la zona del infrarrojo térmico, que se considera entre  $3\ \mu\text{m}$  y  $14\ \mu\text{m}$ .

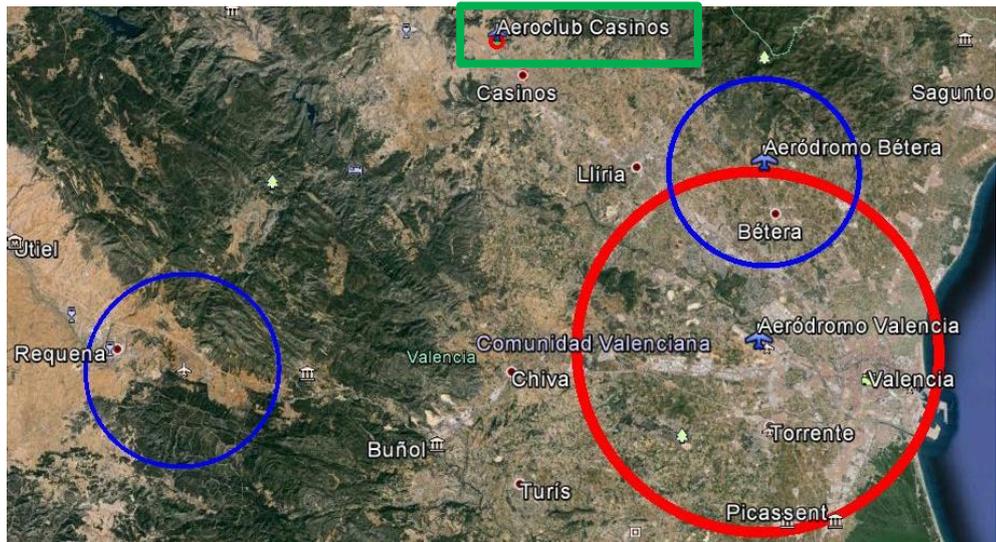
Con ello se obtiene una ventaja sobre la utilización de drones en materia de inspección de parques eólicos, siendo la principal ventaja el gasto económico que supone realizarlo con un helicóptero u otra aeronave, el dron puede realizar fotografías desde las distintas partes de los aerogeneradores, obteniendo imágenes desde las distintas perspectivas sin dejar ningún punto ciego que pueda quedar sin captar por imágenes, siendo una inspección dinámica, reproduciendo las imágenes en tiempo real y pudiendo modificar la trayectoria del dron sobre la marcha.

### 3. Zona de vuelo

---

Los vuelos se llevarán a través del multicoptero DJI Matrice 200 TDK. El objetivo es realizar vuelos de prueba en este entorno para comprobar la aeronave y los equipos que instalemos en esta. Para ello se ha elegido el aeroclub de Casinos debido a la gran separación con otros aeródromos que indicamos a continuación y se pueden apreciar en la Figura 3.1.

- Aeródromo Olocau: 17 km
- Aeródromo Bétera: 25 km
- Aeropuerto Valencia: 34 km
- Aeródromo Requena: 38 km
- Aeroclub Castellón: 72 km



**Figura 3.1.-** Localización de los diferentes aeródromos.

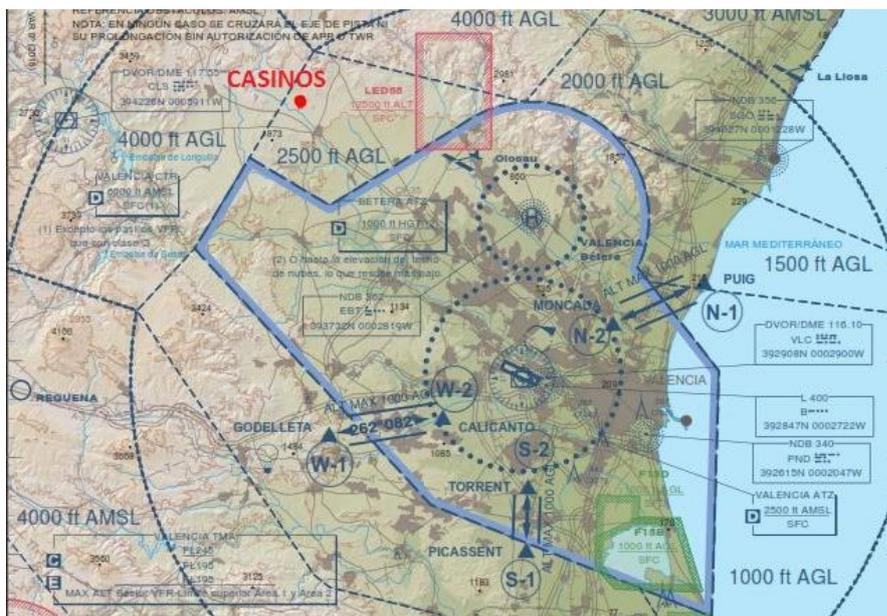
Disponemos de gran separación respecto a núcleos urbanos, el más cercano es el de Casinos y se encuentra a 3,2 km del aeródromo, distancia suficiente ya que estamos obligados a no superar un rango de 500 metros respecto a la zona de despegue.

El vuelo lo realizaremos siempre en línea de vista, con un radio máximo de 500 m al piloto y una altura máxima de 400 pies sobre el suelo (120 metros). En la Figura 3.2. se observa el radio delimitante de la zona de vuelo en la que podemos volar en verde, en rojo vemos la zona de despegue y aterrizaje, donde no podrá entrar ni pasar ninguna persona y en naranja la zona donde se encontrará la tripulación.



**Figura 3.2.-** Zona de vuelo (color verde), zona de aterrizajes y despegues (color rojo) y zona de la tripulación (color naranja).

La Figura 3.3. se corresponde a la carta de aproximación visual del aeroclub de Casinos, donde se puede observar las rutas de aproximación para aeronaves que vuelen en visual. Se observa que la altitud mínima de vuelo para la zona donde realizaremos los vuelos es de 2500 pies respecto la altura del mar, por lo que no entraremos en conflicto con ellas.



**Figura 3.3.-** Carta de aproximación visual

## 4. Relación de riesgos

---

En la operación con los drones, el piloto deberá realizar un estudio de seguridad y gestión de riesgos para valorar el nivel de seguridad de la actividad que se pretende desarrollar. En el análisis de riesgos se considerarán los medios (aeronave y estación de control), el entorno y las personas que intervienen en la operación.

La clasificación de la relación de posibles riesgos que puedan afectar a la realización de los vuelos son:

- Medios
  - Pérdida radio enlace de mando y control
  - Fallo motor eléctrico y regulador electrónico de la velocidad
  - Fallo batería motor
  - Pérdida transmisión video
  - Caída objetos aeronave
  - Aterrizaje zona de emergencia
  - Desequilibrado de las hélices
  - Sujeción de los motores
  - Sujeción de la placa de control
  - Daños en el frame
  - Centro de gravedad desplazado
  - Rotura de hélice
  
- Entorno/externos
  - Fallo del GPS
  - Fallo por meteorología
  - Interacción con aeródromos
  - Vuelo de aves en la zona
  
- Personas
  - Intrusión personas ajenas
  - Caída por factores humanos
  - Interacción con población cercana

### 4.1. Probabilidad de que suceda un accidente

---

En primer lugar estudiamos la probabilidad, según la normativa sobre aeronaves pilotadas por control remoto, sugiere considerarla de las siguientes maneras según su porcentaje:

**Muy alta, 10%:** cuando se considere que el evento puede presentarse más de una vez cada 10 vuelos.

**Alta, 1-10%:** cuando se considere que el evento puede presentarse entre 1 y 10 veces cada 100 vuelos

**Media, 0.1 – 1%:** cuando se considere que el evento puede presentarse entre 1 y 10 veces cada 1000 vuelos

**Baja, 0.01 – 0.1%:** cuando se considere que el evento puede presentarse entre 1 y 10 veces cada 10.000 vuelos

**Muy baja, 0.01%:** cuando se considere que el evento puede presentarse menos de 1 vez cada 10.000 vuelos

A continuación, se detallará la probabilidad de los posibles fallos

- **Pérdida del radio-enlace de mando y control**

Para el radio enlace entre la aeronave y la emisora, utilizaremos el receptor FR-SKY G-RX8R, el cual es del mismo proveedor que el de la emisora. Las especificaciones para la combinación de estos dos sistemas nos indican que pueden llegar a tener un alcance superior a los 2 km de distancia en línea recta entre la emisora y el receptor. Este valor es muy superior a la distancia máxima que actualmente podemos volar con la ley que rige hoy día.

Independientemente de la distancia máxima, esta emisora cuenta con un sistema de seguridad que en todo momento nos muestra por pantalla la calidad de la señal.

También nos podemos encontrar con casos de que hallan objetos que interfieran en la señal y que nos produzcan efectos de apantallamiento en esta, para este caso la emisora también nos avisa de que estamos perdiendo la conexión, pero es un caso más probable dependiendo del entorno en el que nos encontremos.

Por este motivo, la probabilidad de que ocurra este fallo provocado por la pérdida del enlace radio, lo podemos considerar como baja.

- **Fallo del motor eléctrico y regulador de velocidad**

Los motores son de tipo eléctrico. Los fallos típicos de estos motores suelen ser mecánicos. El fallo de cualquier motor en este tipo de aeronave provoca la interrupción inmediata del vuelo, ya que al ser un cuadricóptero, el control de la aeronave funciona con la diferencia de velocidad entre motores, por lo que el fallo en cualquiera de estos provoca una desestabilización del vuelo.

Este tipo de motores suelen experimentar pasos previos a la rotura total del mismo, por lo que suele ser posible detectar cuando un motor de este tipo está funcionando de manera incorrecta. Además, la revisión de mantenimiento previo a la operación permitirá en un principio detectar el incorrecto funcionamiento del motor o de alguna de sus partes. Debido a esto, consideramos baja la probabilidad de que el motor falle durante la operación.

El regulador de velocidad del motor tampoco suele averiarse de forma crítica súbitamente, además de que el plan de revisión y mantenimiento sirve para detectar estos posibles fallos antes de que el RPAS esté en vuelo.

También podemos considerar baja la probabilidad de que el regulador electrónico falle durante un vuelo.

- **Fallo de la batería de alimentación del motor**

La batería de alimentación del propulsor es polímero de litio (lipo), en concreto baterías TB50 para una mayor portabilidad puesto que ofrecen una excelente relación entre capacidad, peso, volumen y tensión.

El calor y los golpes son muy peligrosos para este tipo de baterías tan inestables. Un golpe que haya dañado la batería exteriormente puede haber causado daños internos en la mezcla de los compuestos que hagan que la batería arda. Además, el calor tanto si es localizado como si no, puede provocar aumentos de temperatura internos que desencadenen reacciones no deseadas que hagan fallar la batería.

En caso de un accidente del RPAS es importante proceder a la desconexión de las baterías para evitar posibles incendios de las mismas.

Al hecho de la naturaleza inestable de las baterías, se suma la alta tasa de baterías defectuosas debido a errores a la hora de fabricarlas que no se pueden detectar durante el proceso de elaboración.

Por ello es necesario incluir una revisión de las baterías antes de cada operación y anotar los datos pertinentes en la hoja de seguimiento.

Con estas medidas se considera baja la probabilidad de que falle la batería del motor del RPAS durante el vuelo.

- **Pérdida de la transmisión de video**

Al igual que en el caso de la transmisión de control, el fallo en la transmisión de vídeo es un fallo en el radioenlace y puede deberse a un fallo del receptor, del transmisor o de la señal.

Lo más usual es que el fallo de la transmisión de video se deba a una incorrecta señal causada por interferencias externas o por algún objeto que se interponga entre la línea de visión de los transmisores que produzcan una atenuación de la señal. No existen medidas mitigadoras que puedan erradicar las interferencias en la señal, si bien es verdad que es recomendable apagar los aparatos electrónicos que no estén participando en la operación con el fin de poder evitar errores.

Al igual que con la transmisión de control, consideramos media la probabilidad con la que podemos perder la señal.

- **Caída de objetos de la aeronave**

Los elementos que introduciremos en la aeronave para recogida de datos, tanto sistemas de cámaras como sensores se encontrarán sujetos a la aeronave por medio de la propia sujeción del sistema, por lo que se puede afirmar que la probabilidad de caída de objetos de la aeronave es muy baja.

- **Aterrizaje de emergencia en zona no acondicionada para ello**

Para el control del multirroto no disponemos de un sistema de vuelo automático que nos permita volver a ciertos puntos en caso de fallo. En caso de tener que realizar un aterrizaje de emergencia lo debemos de realizar en la vertical del punto en el que nos encontremos.

En caso de encontrarnos en un vuelo manual, se buscará una zona libre de obstáculos o al menos libre de personas y realizaremos un aterrizaje intentando dañar lo menos posible tanto a la aeronave como al entorno.

Lo probabilidad de realizar un aterrizaje de emergencia en una zona no acondicionada es muy baja.

- **Desequilibrio de las hélices**

Una posible causa de vibraciones es el desequilibrado de las hélices, cuando el material es de plástico, éstas no suelen venir equilibradas, deberemos de realizar un trabajo previo para ajustarlas, con el fin que causen el mínimo de vibraciones a la estructura.

La probabilidad de este problema es media, ya que en el caso de las hélices de plástico, resulta muy impreciso realizar un ajuste a mano de las hélices.

- **Sujeción de los motores**

La fijación de los motores deberá de ser asegurada por medio de un fijador de tornillos. En caso de disponer de una llave dinamométrica, serán ajustados al par recomendado por el fabricante. La probabilidad de que los tornillos cedan es media, por esta razón, en el manual de mantenimiento, al finalizar cada operación comprobaremos el estados de los tornillos de los motores.

- **Sujeción de la placa de control**

A la hora de fijar la placa de control al RPAS, será fijada con un sistema anti vibración, con el fin de que las vibraciones que produzcan los motores afecten lo mínimo posible a los sensores internos que posee la placa. La probabilidad de que este error ocurra es baja, ya que de fábrica, el multicopteros posee un sistema anti-vibraciones.

- **Daños en el frame**

Pueden provocar la rotura de brazos del multicoptero o de la propia estructura de la aeronave. Serán provocadas por golpes fuertes del propio RPAS. Las grietas en el frame son difíciles de localizar, siendo distinguibles únicamente por medio de un análisis exhaustivo de éste. La probabilidad de este tipo de fallo es muy baja.

- **Centro de gravedad desplazado**

Debido al desplazamiento de componentes del RPAS en vuelo, se puede dar lugar a que la aeronave no se comporte de forma correcta, no se encontrará estabilizado y realizará giros que no correspondan o se inclinará hacia delante o atrás.

Con el fin de evitar este error, antes de cada vuelo, se deberá fijar todos los elementos de carga del RPAS de una manera segura que garantice el no desplazamiento de ningún elemento durante todas las fases de vuelo. Podemos decir, que la probabilidad de que el centro de gravedad se encuentre desplazado es baja.

- **Rotura de hélice**

La rotura de hélices para este tipo de aeronaves se produce cuando a la hora de realizar un aterrizaje inclinamos excesivamente la aeronave hacia uno de sus lados, tocando con el suelo y rompiendo la hélice. La probabilidad de este tipo de fallos es media, ya que depende de la inclinación del suelo realizaremos un mejor o peor aterrizaje.

- **Fallo del posicionado GPS**

Hay que tener en cuenta a la hora de realizar el estudio para cada operación que se realice para considerar si cabe la posibilidad de que algún objeto nos interrumpa la señal de GPS o si la propia orografía del terreno puede dar lugar a tener algún error en el receptor. Las extensiones de terreno llano harán que en un principio no tengamos que preocuparnos por la imposibilidad de visualizar el número de satélites mínimo, o del hecho de que algún obstáculo pueda impedirnos recibir señal.

En nuestro caso, la pérdida de la señal GPS es un hecho importante porque el piloto automático trabajará en modo Auto, que es un modo en el que el RPAS seguirá una misión definida como un conjunto de waypoints GPS y otros comandos, establecidos en la configuración de la estación de tierra.

No existen medidas mitigadoras que puedan prever o evitar el fallo de la señal GPS. Lo único que podemos hacer es, con el RPAS en tierra antes de despegar, comprobar que la señal GPS

funciona bien en ese momento. A la vista de todo lo estudiado la probabilidad de fallo de la señal, y por consiguiente del posicionado GPS, se considera media.

- **Fallo por meteorología**

Las condiciones meteorológicas en un espacio no se mantienen constantes a lo largo del día, por esta razón, antes de cada vuelo se debe de comprobar previamente el METAR (informe meteorológico) o TAFOR (pronóstico meteorológico) de la zona donde realizaremos el vuelo, ya que nos darán una previsión meteorológica a lo largo de

Según la normativa de seguridad aérea una aeronave como la nuestra puede grabar en exteriores siempre que sea de día y en condiciones meteorológicas visuales. Además, no puede sobrevolar aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado, dentro del alcance visual del piloto a una distancia de éste no mayor de 500 m.

La probabilidad de fallo del RPAS debido a condiciones meteorológicas inadecuadas y surgidas de forma más o menos repentina existe, aunque vamos a considerarla muy baja, debido a la presencia tanto del piloto como del encargado de seguridad vigilando tanto el vuelo como las condiciones del mismo.

- **Interacción con los aeródromos colindantes a la zona de trabajo**

Para todas las operaciones tendremos que dejar una distancia de seguridad entre los aeródromos de un mínimo de 8 km, además, para aquellos que posean sistema de guiado de ILS esta distancia aumentará a 15 km.

Otra comprobación que realizaremos será estudiar todas las cartas del aeródromo de altitudes mínimas (con esta sabemos la altura a la que las avionetas no pueden descender) y las de obstáculos alrededor del aeropuerto, para tener una referencia de todos los obstáculos con los que nos podemos encontrar y porque zonas podríamos encontrarnos con aeronaves que vuelen por la misma zona que nosotros. Por lo que la probabilidad de interactuar con el trabajo de otros aeropuertos se considerará muy baja.

- **Vuelo de aves en la zona de trabajo**

Normalmente en este tipo de operaciones las aves no suponen un grave problema pues la mayoría no suelen acercarse al dron. Como ya se ha comentado anteriormente siempre existe la posibilidad de que un depredador decida atacar al dron, pero es una posibilidad remota y no existen medidas preventivas contra eso, se considerará muy baja la probabilidad de ocurrencia de este hecho.

- **Intrusión de personas ajenas a la tripulación**

Las operaciones las realizaremos tanto en aeroclubs como en zonas abiertas donde cualquier persona puede acceder. Para evitar riesgos controlaremos que nadie acceda a la Zona de Seguridad Operacional y controlaremos el paso de las personas por este espacio, ya que no puede permanecer ninguna persona en la zona de aterrizaje de la aeronave en caso de que tengamos que realizar un aterrizaje de emergencia en cualquier momento.

El área a la que sí que pueden acceder y permanecer en ella si es necesario, es la zona de vuelo, debido entre otras cosas a que el RPAS no sobrevuela mucho esa zona.

Considerando todos estos hechos, clasificamos como media la probabilidad de que haya personas en los alrededores de la zona de operación.

- **Fallo/caída de la aeronave debido a factores humanos**

Hay diversos factores que pueden afectar a la persona que se encuentre a los mandos de la aeronave, como puede ser deslumbramiento por el sol o el exceso de información que le pueda estar llegando. Por esta razón en el manual de operaciones se incluirán las tareas correspondientes a cada persona en la operación para no sobrecargar a ningún empleado.

Considerando todos estos factores, clasificamos como muy baja la probabilidad de que se produzca una caída de la aeronave por factores humanos.

- **Interacción con la población más cercana a la zona de operación**

El entorno que elegiremos se encontrará fuera del entorno de cualquier núcleo urbano en el que la aeronave pueda acceder. Por esta razón, en el estudio que se realice previamente para cada operación se tendrá en cuenta las distancias a cada entorno urbano. Además de que actualmente está prohibida la intrusión de cualquier RPAS dentro de entornos urbanos, por lo que consideraremos nula la probabilidad de interacción con poblaciones cercanas.

## **4.2. Severidad de los peligros enumerados**

---

En cuanto al estudio de las consecuencias (severidad) se utilizará la siguiente valoración:

**Muy alta:** puede causar muerte o incapacidad total permanente en personas, pérdidas económicas superiores a 700.000 euros, o daños graves irreversibles al medio ambiente.

**Alta:** puede causar incapacidades parciales permanentes, lesiones o enfermedad profesional que pueda resultar en hospitalización de al menos tres personas, pérdidas económicas entre 150.000 y 700.000 euros, o daños graves al medio ambiente reversibles con aplicación de medidas de corrección.

**Media:** puede causar lesiones o enfermedades ocupacionales que resulten en uno o más días de trabajo perdidos, pérdidas económicas entre 7.000 y 150.000 euros, o daños mitigables al medio ambiente sin necesidad de aplicación de medidas de corrección.

**Baja:** puede resultar en una lesión o enfermedad que no resulte en una pérdida de jornada de trabajo, pérdidas económicas entre 1.500 y 7.000 euros, o daños mínimos al medio ambiente que no requieren restauración.

**Muy baja:** podría resultar en pérdidas económicas inferiores a 1.500 euros

A continuación, se detallará la severidad de los posibles daños.

- **Pérdida del radio-enlace de mando y control**

Debemos comprobar el funcionamiento del radioenlace antes de salir, aunque no existen medidas que reduzcan realmente la probabilidad de que falle, para la severidad de este evento es la se considerarán los siguientes puntos:

-Si el radioenlace entre el RPAS y el control del piloto se recupera mientras la aeronave se encuentra retrocediendo al lugar de despegue, el RPAS no tendría ni si quiera que llegar a aterrizar y la severidad se puede considerar muy baja.

-Si por el contrario, el RPAS debe realizar un aterrizaje, la severidad se considerará baja, debido a las pérdidas económicas que supondría en la misión, ya que el único fallo que puede ocurrir es que aterrice en una zona no habilitada para ello.

- **Fallo del motor eléctrico y del regulador electrónico de velocidad**

El fallo crítico de cualquier motor y/o regulador electrónico de velocidad de este sistema tiene como resultado la imposibilidad de seguir propulsando el RPAS. Ya que se trata de un cuadrirotor, el control de la aeronave se basa en la variación de velocidad entre motores, el fallo de cualquiera de estos motores, finaliza el vuelo inmediatamente y el RPAS cae directamente.

- **Golpe del RPAS contra el suelo:** Si cae directamente contra el suelo, los únicos desperfectos que causaremos serán en la propia aeronave, que podremos reparar. Por ello la severidad de que el RPAS llegue al suelo se puede considerar baja, ya que los únicos desperfectos serán económicos en la aeronave.

- **Golpe del RPAS contra la tripulación:** Un golpe contra la tripulación solo sería posible en caso de que el propio fallo del motor, este se encuentre volando por encima de ellos, por esta razón se obliga a todos las personas implicadas en el vuelo a usar casco. Con esta norma de seguridad, y teniendo en cuenta el peso de los RPAS que utilizaremos, la severidad del mismo puede considerarse media.

- **Golpe del RPAS contra una persona ajena a la actividad:** la posibilidad de que el RPAS golpee a una persona ajena a la operación siempre existe aunque se han desarrollado medidas mitigadoras contra este hecho (no permitir el paso de personas a zonas restringidas). Aun así, el golpe del RPAS a una persona sin protección, aunque su velocidad no sea muy elevada, se considera de severidad alta.

- **Golpe del RPAS contra un vehículo:** también existe la posibilidad de que el RPAS golpee a un coche, ya que las zonas de vuelo pueden ser penetradas por caminos sin asfaltar o por parcelas colindantes con la zona de vuelo. La severidad de estos golpes puede considerarse baja ya que acarrearían pérdidas económicas. .

- **Fallo de la batería de alimentación del motor**

El fallo del sistema de alimentación provoca que todos los motores de la aeronave dejen de funcionar, ya que al tratarse de un cuadrirotor, no tiene la posibilidad de continuar el vuelo planeando, por lo que el dron finaliza el vuelo inmediatamente y cae directamente, la severidad de este fallo se considera baja.

- **Pérdida de la transmisión de video**

Al perder el sistema de video, el procedimiento que debemos de seguir es aterrizar en el mismo lugar donde hemos perdido la conexión. El mayor problema que nos podemos encontrar, es aterrizar en una zona que no se encuentre habilitada para ello, por lo que la severidad de este fallo la consideraremos muy baja.

- **Caída de objetos de la aeronave**

Se estudiará la severidad de la caída del objeto en función de donde caiga.

-**Golpe del RPAS contra el suelo:** la consecuencia que puede acarrear este golpe son daños físicos en el RPAS, lo que se traduce en pérdidas económicas que pueden llegar a tener una severidad calificada como baja.

-**Golpe del RPAS contra la tripulación:** en este caso las consecuencias son tanto económicas como personales a pesar de la protección de la tripulación. Por ello la severidad se considera media.

**-Golpe del RPAS contra una persona ajena a la actividad:** el peligro extra de este golpe con respecto al anterior es que las personas ajenas a la actividad van desprotegidas, por eso se considera alta la severidad del mismo.

**-Golpe del RPAS contra un vehículo:** los mayores desperfectos en este golpe los sufriría el RPAS, debido a su escaso peso y dimensión comparado con un vehículo como puede ser un coche. Las pérdidas económicas hacen que sea baja la severidad.

- **Aterrizaje de emergencia en zona no acondicionada para ello**

El piloto deberá de realizar un aterrizaje en una zona que no se encuentre acondicionada para esto, ya que el sistema posee un sistema de visión en primera persona, el piloto deberá de escoger una zona en la que los daños que cause sean mínimos, por lo que la severidad de este fallo se considera baja, ya que los mayores daños van a ser causados en el propio RPAS.

- **Desequilibrado de las hélices**

Una posible causa de vibraciones es el desequilibrado de las hélices, cuando el material es de plástico, éstas no suelen venir equilibradas, deberemos de realizar un trabajo previo para ajustarlas, con el fin que causen el mínimo de vibraciones a la estructura.

La severidad de este problema es media, ya que causará movimientos no deseados en la cámara y problemas en la captación de datos por parte de los sensores

- **Sujeción de los motores**

Un motor que no se encuentre bien fijado, provocará vibraciones en este brazo que se transmitirán por toda la estructura, además de poder causar la propia rotura del motor que no se encuentre fijado correctamente. La severidad de este problema la consideraremos media, ya que nos afectará al rendimiento del RPAS, además de existir la probabilidad de pérdida de control.

- **Sujeción de la placa de control**

La severidad de no contar con un sistema anti-vibración de la placa controladora la consideraremos alta, ya que puede provocar medidas erróneas en los sensores de la propia placa, provocando la pérdida de control de esta.

- **Daños en el frame**

La severidad de este problema la consideraremos alta, debido a las vibraciones que soportan los multicopteros, cualquier grieta en la estructura de este, puede aumentar en cualquier momento y suponer la pérdida del RPAS.

- **Centro de gravedad desplazado**

Debido a los componentes que introduciremos en el RPAS, se puede dar el problema que su centro de gravedad se encuentre desplazado respecto a la posición inicial.

La severidad de este problema es baja ya que solo afectara al control de la aeronave. En la lista pre-vuelo queda contemplado los pasos a realizar antes de comenzar los vuelos.

- **Rotura de hélice**

Las hélices son la parte más externa de este multirrotor, por lo que en caso de golpe o mal aterrizaje será el componente que antes se rompa. Una rotura de la hélice solo es causada por estos motivos. Se considera una severidad baja, ya que el gasto económico que supone es bajo y el tiempo que se tarda en realizar el cambio es muy corto.

Cualquier grieta o fisura que encontremos en la inspección pre-vuelo supondrá que debemos de cambiar la hélice, para que no suponga un fallo mayor.

- **Fallo del posicionado GPS**

El fallo del posicionado GPS tiene como consecuencia el cambio del modo de operación, que pasará de modo GPS a modo P-ATTI, en el que la estabilización del RPAS solo dependerá de la altura a la que se encuentre, ya que en este modo, será el viento el que te lleve.

No es posible aplicar ninguna medida mitigadora al fallo de la señal GPS más allá de comprobar que esta sea correcta antes de despegar.

Sin embargo, la consecuencia directa del fallo de la señal GPS es que no puede seguir desarrollando la misión, pero en ningún momento afecta a la integridad del RPAS ni de ninguna persona, por lo que la severidad se considera media.

- **Fallo por meteorología**

En caso de que no se cumplieran alguno de los mínimos meteorológicos, el piloto debe hacer que el RPAS pase a modo RTL y aterrice de forma inmediata.

En caso de que aun con las precauciones tomadas sucediera algún incidente, las consecuencias varían dependiendo del resultado del incidente o accidente. Si el RPAS empieza a tener dificultades para llegar al punto de aterrizaje pero a pesar de ello no cae, se puede considerar nula la severidad del fallo.

Sin embargo, si el RPAS llega a caer, las consecuencias pueden ser diversas, como ya hemos mencionado en puntos anteriores.

- **Interacción con los aeródromos colindantes a la zona de trabajo**

Como ya se ha especificado, la distancia entre la parcela y el aeródromo más cercano no tiene porqué ser un problema si la tripulación está en coordinación con el mismo. La coordinación entre ambas partes es una medida mitigadora del riesgo que genera la cercanía entre ambos lugares y gracias a ella, se puede conseguir que no haya problemas en el desarrollo de las operaciones del aeródromo ni de la del RPAS. Por ello se considera media la severidad de este hecho, ya que siempre existe cierto riesgo.

- **Vuelo de aves en la zona de trabajo**

La intrusión de aves en la zona es un riesgo que no se puede minimizar ni controlar aunque el comportamiento normal de las mismas es no acercarse al RPAS, lo que supone una ventaja para nuestra operación, pues podrían dificultar el desarrollo de la misma. Se puede dar la posibilidad que la interacción con las aves produzca una caída de la aeronave, si el RPAS llega a caer, las consecuencias pueden ser diversas, como ya hemos mencionado en puntos anteriores.

- **Intrusión de personas ajenas a la tripulación**

La norma de restringir la entrada de personas ajenas a la tripulación en el área de trabajo es por la propia seguridad de estas personas más que por la propia integridad de la operación. El único modo por el que la intrusión de una persona pueda poner en riesgo la operación es en caso de que dificulte la actividad del piloto a los mandos.

Por esta razón el piloto a los mandos deberá de poseer una identificación que lo reconozca como tal y que no debe de ser molestado durante la realización de la actividad aérea. Por esta razón y teniendo en cuenta las medidas preventivas consideradas, la severidad de esta intrusión es muy baja.

○ **Fallo/caída de la aeronave debido a factores humanos**

El piloto puede tener algún fallo en su control del RPAS que haga que este experimente un error en el desarrollo de su misión o que peligre su estabilidad. A pesar de esto, si el fallo hace que el RPAS no caiga, si no que puede recuperarse en vuelo o incluso puede aterrizar, recuperarse y volver a despegar, podemos considerar nula la severidad del mismo.

Si por el contrario el RPAS experimenta una caída que se debe a factores humanos, es porque el descontrol del dron es total y puede caer o golpear en cualquier parte, consideraremos la severidad de este caso, baja.

○ **Interacción con la población más cercana a la zona de operación**

Como ya se ha especificado antes, las distancias que separa las poblaciones más cercanas de las parcelas que seleccionaremos para realizar las investigaciones, estarán lo más separadas posible de los núcleos urbanos, lo que hace que la interacción entre la zona de vuelo delimitada para el RPAS y las poblaciones o sus inmediaciones sea mínima.

No se sobrevolarán poblaciones y se extremarán las medidas en el caso de que el área de la operación se sitúe relativamente cercana a una población. Por tanto podemos considerar la severidad de su proximidad como muy baja.

### 4.3. Riesgo de las operaciones e índice de riesgo

El índice de riesgo de un suceso se obtiene cuando combinamos la probabilidad y la severidad del mismo. Cada uno de los peligros especificados tendrá un índice de riesgo que exponemos a continuación y que se determina con la Tabla 1 donde 25 es el número que indica la máxima probabilidad (frecuencia) de que ocurra y la máxima severidad (consecuencias) del daño causado. El mínimo sería, como puede observarse el 1 en ambas medidas, el resultado no es más que una multiplicación de los valores severidad y frecuencia entre sí para determinar así el nivel de riesgo.

<b>Índice de riesgo</b>						
<b>Severidad</b>	<b>Probabilidad</b>					
		<b>Muy bajo (1)</b>	<b>Bajo (2)</b>	<b>Medio (3)</b>	<b>Alto (4)</b>	<b>Muy alto (5)</b>
	<b>Muy alto(5)</b>	5	10	15	20	25
	<b>Alto (4)</b>	4	8	12	16	20
	<b>Medio (3)</b>	3	6	9	12	15
	<b>Bajo (2)</b>	2	4	6	8	10
	<b>Muy bajo (1)</b>	1	2	3	4	5

**Tabla 1.** Valores del índice de riesgo

Con los resultados de la tabla anterior, se pueden distinguir tres casos para considerar la gravedad del índice de riesgo:

- Entre 0 y 6 puede ser aceptable, pero revisar la operación para ver si el riesgo puede ser reducido más adelante.
- Entre 7 y 14, la operación se llevará a cabo con la autorización explícita de la dirección, y deberá ser redefinida en la medida de lo posible teniendo en cuenta los riesgos implicados o proceder a reducirlos antes del comienzo de la operación.
- Entre 15 y 25, la operación no debe realizarse y se rediseñará la operación o ampliarán las medidas de seguridad para reducir el índice de riesgo antes de iniciar la operación.

En la siguiente tabla incluimos la probabilidad, severidad, índice de riesgo y posibles mitigaciones de un modo resumido.

	Peligro	Probabilidad	Severidad		Índice
<b>Medios</b>	Fallo transmisión de control	BAJA	Sin aterrizaje	MUY BAJA	2
			Con aterrizaje	BAJA	4
	Fallo del motor eléctrico	BAJA	Golpe suelo	BAJA	4
			Golpe tripulación	MEDIA	6
			Golpe persona ajena	ALTA	8
			Golpe vehículos	BAJA	4
			Golpe suelo	BAJA	4
	Fallo del regulador electrónico de velocidad	BAJA	Golpe tripulación	MEDIA	6
			Golpe persona ajena	ALTA	8
			Golpe vehículos	BAJA	4
			Golpe suelo	BAJA	4
	Fallo de la batería de alimentación del motor	BAJA	BAJA		4
	Fallo de la transmisión de video	MEDIA	MUY BAJA		3
	Caída de objetos de la aeronave	MUY BAJA	Golpe suelo	BAJA	2
			Golpe tripulación	MEDIA	3
			Golpe persona ajena	ALTA	4
Golpe vehículos			BAJA	2	
Aterrizaje zona de emergencia no acondicionada	MUY BAJA	BAJA		2	
Desequilibrado de las hélices	MEDIA	MEDIA		9	
Sujeción de los motores	MEDIA	MEDIA		9	
Sujeción de la placa control	BAJA	ALTA		8	
Daños en el frame	MUY BAJA	ALTA		4	
Centro de gravedad desplazado	BAJA	BAJA		4	
Rotura de hélice	MEDIA	BAJA		6	
<b>Entorno/externos</b>	Fallo del posicionado GPS	MEDIA	MEDIA		9
	Fallo debido a meteorología	MUY BAJA	Golpe suelo	BAJA	2
			Golpe tripulación	MEDIA	3
			Golpe persona ajena	ALTA	4
			Golpe vehículos	BAJA	2
	Interacción con los aeródromos colindantes	MUY BAJA	MEDIA		3
	Intrusión aves	MUY BAJA	Golpe suelo	BAJA	2
			Golpe tripulación	MEDIA	3
			Golpe persona ajena	ALTA	4
			Golpe vehículos	BAJA	2
<b>Personas</b>	Intrusión personas ajenas a la actividad	MEDIA	MUY BAJA		3
	Fallo debido a factores humanos	MUY BAJA	Sin caída del RPAS	NULA	0
			Con caída del RPAS	BAJA	2
Interacción con la población cercana	NULA	MUY BAJA		0	

**Tabla 2.** Resumen probabilidad, severidad y riesgo de los posibles peligros estudiados.

A la vista de los resultados obtenidos el hecho que más riesgo entraña en el desarrollo de la operación es que entren personas ajenas a ella en cualquiera de las zonas definidas para su correcto desarrollo. Sin embargo es un área muy extensa y hemos definido medidas mitigadoras suficientes como para prevenir accidentes con el RPAS. La operación es viable.

## 5. Medidas técnicas de prevención y protecciones

---

El piloto, se responsabilizará de todas las acciones que deba realizar desde el mismo momento que monta los motores aunque no exista movimiento del RPAS. Por otra parte es conveniente que el piloto realice como mínimo una inspección del dron antes de cada vuelo comprobando que el estado del hardware se encuentra correctamente, y que el comportamiento del software que va a utilizar para comunicarse con la aeronave funciona correctamente.

Para evitar cualquier incidencia de las que hemos mencionado en el anterior estudio de seguridad impondremos una serie de limitaciones y procedimientos a la hora de desarrollar la operación con fin de realizarla en un entorno lo más seguro posible. Entre los procedimientos encontraremos los siguientes.

- Limitar la zona de trabajo con el fin de que cualquier persona ajena a la operación no corra ningún riesgo.
- Despejar y acotar la pista de despegue para que ninguna persona la invada en ningún momento por si fuese necesario realizar un aterrizaje de emergencia.
- Lectura de listas de comprobación para detectar cualquier fallo en la propia aeronave o en el entorno.
- El piloto debe seguir unas pautas como no beber alcohol antes del vuelo, estar descansado y encontrarse en plenas facultades físicas y psíquicas. En caso de no encontrarse bien deberá de cancelar la operación, siendo su responsabilidad la de iniciar el vuelo.
- Lectura METAR y TAFOR para determinar la seguridad de la operación por si debido a climatología adversa no podemos realizar el vuelo. Una vez llegados al campo de trabajo, también se comprobará en ese momento y lugar el estado meteorológico, para decidir si es seguro llevar a cabo la operación o posponerla.
- Realizar un manual de mantenimiento de la aeronave para la prevención de posibles fallos, el cual lo añadiremos en otro documento, especificando para cada componente los periodos de revisión de estos y la forma de proceder para cada uno de ellos.
- Los pilotos deberán usar casco con el fin de evitar que cuando la aeronave vuele por cerca de ellos y en caso de que se produzca un fallo se produzca cualquier daño en el piloto.
- Obligatorio realizar operaciones con el observador que en todo momento sea consciente de donde se encuentra la aeronave y sea capaz de orientar al piloto sin este tener al RPAS en su línea de visión directa.
- Condiciones meteorológicas, nunca se deberá de volar la aeronave en condiciones de viento que superen a las que se encuentran en la caracterización de esta, como tampoco deberá de llevarse a cabo la operación en caso de lluvia si la aeronave no se encuentra habilitada para esto.

Es totalmente obligatorio evaluar los riesgos que puedan existir para la operativa que se va a realizar. Se deberá analizar como mínimo la afección con respecto al entorno donde va a trabajar, ¿existen cables aéreos?, ¿hay aglomeraciones de personas?, ¿cómo debo evitarlas?, los medios que va a disponer e incluso el estado de salud emocional que pueda tener el piloto el día de la operación.

Antes de iniciar el vuelo, se consultarán las siguientes instituciones:

- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), con la finalidad de conocer la información relativa a la meteorología ya que en condiciones de viento, niebla o precipitaciones y siempre velando por la seguridad, no es recomendable realizar ningún trabajo.

- AIP (Publicación de Información Aeronáutica) emitido por ENAIRE, donde se encontrará la información de carácter permanente y cambios temporales de larga duración, su utilización es esencial para la navegación aérea para conocer las restricciones o prohibiciones del espacio aéreo donde se va a realizar la operación.

- NOTAM (Notice to Airmen), también publicadas por ENAIRE, para garantizar que no exista ninguna condición anormal en la zona. Los NOTAM informarán al piloto si con carácter temporal existe alguna recomendación o información que deba conocer relativa al área donde se trabajará.

Se considera accidente cuando se producen daños e incidente cuando se sufre una emergencia, que aún sin daños producidos, ponga en peligro la seguridad de terceras personas o de la aeronave. En caso de accidente, habrá que dar cuenta la autoridad competente, la CIAIAC (Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de la Aviación Civil), en un plazo no superior a 10 días.

## 6. Cuestionario de seguridad para la aeronave y su equipo de control

---

Este cuestionario está enfocado como ayuda para la evaluación de la seguridad de operaciones de RPAS. Está basado en experiencias previas, y será modificado según se amplíe la experiencia con operaciones no críticas con drones. Estas preguntas deberán de hacerse antes de realizar nuestro trabajo. De ello depende el éxito del mismo y la seguridad de la aeronave así como el piloto y demás componentes del equipo. Por ejemplo, algunas de las preguntas para evaluar la seguridad pueden ser:

- ¿Se han determinado las limitaciones meteorológicas que permitan una realización segura de la operación?
- ¿Qué características de diseño presenta el sistema para evitar la pérdida de radioenlace de control?
- En caso de pérdida de radioenlace de control. ¿Cómo se determina que el RPA ha perdido el radioenlace? ¿Cómo se muestra esta información al piloto?
- ¿Utiliza el RPAS señal de GPS para control y/o guiado del RPA?
- ¿Se han establecido procedimientos de inspección de la zona de vuelo para asegurarse que no hay terceras personas en ella o instalaciones que no deban ser sobrevoladas? Si tras la inspección se han encontrado personas o instalaciones a proteger, ¿se han establecido procedimientos para garantizar un margen de seguridad suficiente?
- Si la operación requiere el transporte de mercancías peligrosas para la salud o el medio ambiente, ¿se han solicitado los permisos correspondientes a la AESA?
- ¿Qué procedimiento se sigue durante la operación para la detección de otras aeronaves, personas o vehículos entrando en la zona de operación?
- ¿Cómo se determina la posición del RPA? ¿Cómo se muestra esta información al piloto?
- ¿Se ha definido la distancia máxima entre el piloto y el RPA para vuelo en línea de vista?
- En vuelo más allá de línea de vista, ¿cómo responde el sistema ante la pérdida de los medios primarios de navegación?
- ¿Qué características de diseño presenta el sistema para evitar que el RPA exceda los límites del volumen de espacio aéreo previsto para la operación?
- ¿Está previsto realizar el estudio de la situación meteorológica para cada operación que se vaya a realizar?
- ¿Está previsto verificar previamente a cada operación que se vaya a realizar que nuestra aeronave está dentro de los límites de viento, visibilidad, precipitación y techo de nubes para el desarrollo de la actividad?

- ¿Está previsto verificar previamente a cada operación que se vaya a realizar que la zona de despegue y aterrizaje es adecuada para la aeronave que se vaya a utilizar?
- ¿Está previsto realizar antes de cada vuelo (o para cada configuración de la aeronave que se vaya a utilizar) la verificación de que el peso y posición del centro de gravedad están dentro de los límites establecidos por el fabricante?
- ¿Se ha establecido un tiempo máximo de operación y mínimo de descanso para garantizar que no se incrementa el nivel de riesgo de la operación por fatiga del piloto?
- ¿Considera que se han establecido los procedimientos adecuados para mitigar el riesgo en caso de que el RPA exceda los límites del volumen de espacio aéreo previsto para la operación?
- ¿Considera que las características de diseño del RPAS y los procedimientos establecidos para la operación garantizan la seguridad de terceras personas, propiedades o vehículos?

## 7. Aerogeneradores

---

### 7.1. Definición

---

Continuamos, conociendo más a fondo lo que es un aerogenerador y sus principales componentes, en especial las palas que son el objeto de estudio del presente trabajo y las principales averías a localizar con nuestros dron.

Un aerogenerador, como señalaba al inicio de este trabajo, es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica, dicho de otro modo, la energía cinética del aire proporciona energía mecánica a un rotor hélice, que a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. Las palas de un aerogenerador giran entre 13 y 20 revoluciones por minuto, ya sea a una velocidad constante o bien a velocidad variable, donde la velocidad del rotor varía en función de la velocidad del viento para alcanzar una mayor eficiencia.



**Figura 7.1.-** Aerogenerador de empresa española de promoción y gestión de infraestructuras y energías renovables ACCIONA.

### 7.2. Funcionamiento

---

El funcionamiento de un aerogenerador puede explicarse en función de las siguientes fases:

#### **Orientación automática**

El aerogenerador se orienta automáticamente para aprovechar al máximo la energía cinética del viento, a partir de los datos registrados por la veleta y anemómetro que incorpora en la parte superior.

#### **Giro de las palas**

El viento hace girar las palas, que comienzan a moverse con velocidades de viento de unos 3,5 m/s y proporcionan la máxima potencia con unos 11 m/s. Con vientos muy fuertes (25 m/s) las palas se colocan en bandera y el aerogenerador se frena para evitar tensiones excesivas.

#### **Multiplicación**

El rotor, conjunto de tres palas engarzadas en el buje (pieza cilíndrica que reviste por el interior los elementos mecánicos que giran alrededor de un eje), hace girar un eje lento conectado a una multiplicadora que eleva la velocidad de giro desde unas 13 a unas 1.500 revoluciones por minuto.

## Generación

La multiplicadora, a través del eje rápido, transfiere su energía al generador acoplado, que produce electricidad.

## Evacuación

La energía generada es conducida por el interior de la torre hasta la base y, desde allí, por línea subterránea hasta la subestación, donde se eleva su tensión para inyectarla a la red eléctrica y distribuirla a los puntos de consumo.

## Monitorización

Todas las funciones críticas del aerogenerador están monitorizadas y se supervisan desde la subestación y el centro de control, para detectar y resolver cualquier incidencia.

## 7.3. Componentes de un aerogenerador

Los molinos eólicos son complejos y bastas construcciones que pueden llegar a medir casi 200 metros de altitud con las palas incluidas y tener un peso de hasta 20 toneladas. Están formados por una gran variedad de componentes que se describen a continuación.

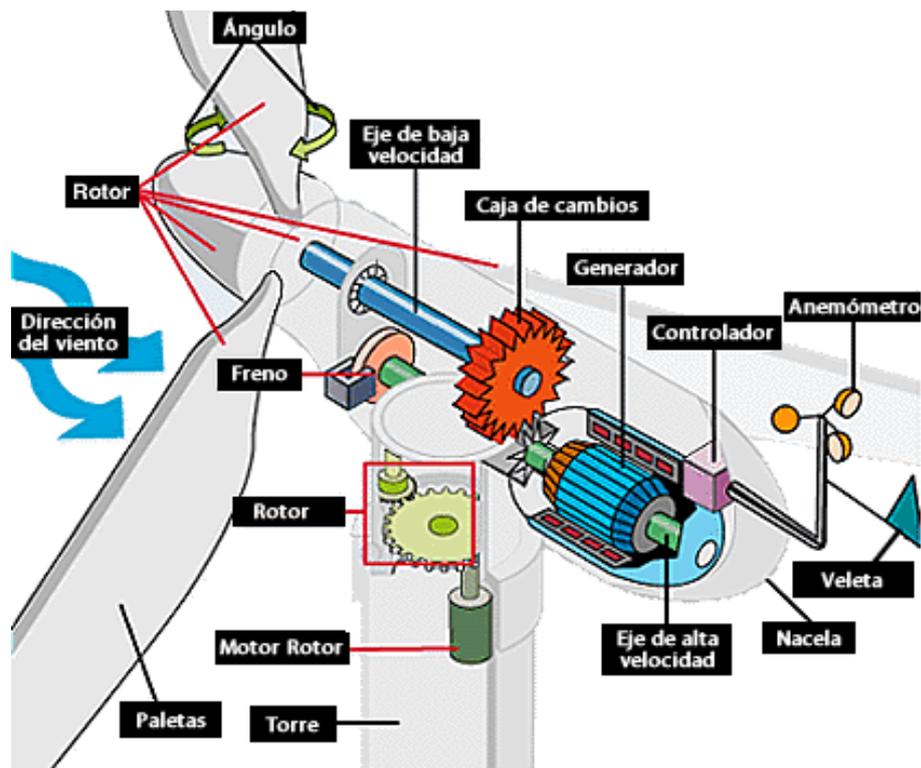


Figura 7.2.- Partes principales de un aerogenerador.

## Cimentación

Los aerogeneradores actuales de eje horizontal están constituidos por una cimentación subterránea de hormigón armado, adecuada al terreno y a las cargas del viento, sobre la cuál se levanta una torre.

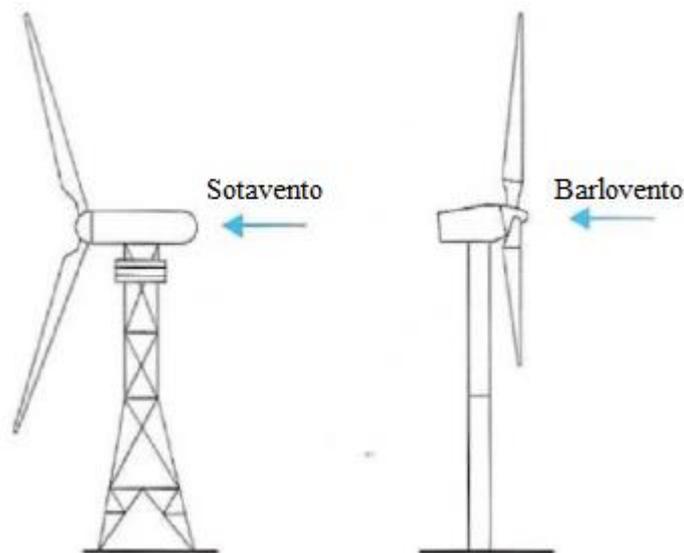
## Torre

La torre de un aerogenerador es el elemento estructural que soporta todo peso del aerogenerador y mantiene elevadas del suelo las palas de la turbina. Está hecha de acero y normalmente hueca por dentro para poder permitir el acceso a la góndola. Esta suele ser típicamente de acero de tipo tubular u hormigón armado (en la actualidad se suelen utilizar estructuras mixtas en las que la parte inferior es de hormigón y la superior de acero). Elevan el aerogenerador lo suficiente como para que sea capaz de acceder a velocidades del viento mayores, en contraste con las bajas velocidades en los puntos cercanos al terreno y la existencia de turbulencias. Al extremo de la torre se fija una góndola giratoria de acero o fibra de vidrio.

### **Rotor y palas**

Normalmente las turbinas modernas están formadas por dos o tres palas, siendo lo normal el uso de tres por la mayor suavidad en el giro que proporciona y su mayor estabilidad estructural y aerodinámica, menor emisión de ruido y mayor rendimiento energético. Las palas están fabricadas de un material compuesto de matriz polimérica (poliéster) con un refuerzo de fibras de vidrio o carbono para dar mayor resistencia. Pueden medir longitudes en el rango desde 1 metro hasta 100 metros y van conectados al buje del rotor. Dentro del buje hay ciertos elementos mecánicos que permiten variar el ángulo de incidencia (o pitch) de las palas.

Otra posible clasificación es según la disposición frente a la dirección el viento incidente. En la mayoría de los casos el rotor está situado a barlovento de la torre, con el objeto de reducir las cargas cíclicas sobre las aspas que aparecen si se situara a sotavento de ella, pues al pasar una pala por detrás de la estela de la torre, la velocidad incidente está muy alterada. Debido a este fenómeno, las torres con rotores a sotavento son de celosía metálica, por su mayor transparencia al viento. Las dos configuraciones se representan en la siguiente figura.



**Figura 7.3.-**Disposición del rotor respecto a la dirección del viento incidente

### **Góndola**

La góndola es un cubículo que se puede considerar la sala de máquinas del aerogenerador. Puede girar en torno a la torre para poner a la turbina encarada al viento. Dentro de ella se encuentran la caja de cambios, el eje principal, los sistemas de control, el generador, los frenos y los mecanismos de giro de la góndola. El eje principal es el encargado de transmitir el par de giro a la caja de cambios.

## **Caja de cambios**

La función de la caja de cambios es adecuar la velocidad de giro del eje principal a la que necesita el generador. Por ejemplo en una turbina de 1 MW que tenga un rotor de 52 metros de diámetro girará aproximadamente a 20 revoluciones por minuto mientras que el generador lo hará a 1500 rpm. La relación de la caja de cambios será de  $1500/20=75$ .

## **Generador**

Actualmente hay tres tipos de turbinas, que varían únicamente en el comportamiento que tiene el generador cuando el molino se encuentra en condiciones por encima de las nominales para evitar sobrecargas. Casi todas las turbinas utilizan uno de los tres siguientes sistemas:

- Generador de inducción de jaula de ardilla
- Generador de inducción bifásico
- Generador síncrono

Un generador asíncrono, también denominado generador de inducción como por ejemplo el de jaula de ardilla es el que se empezó a utilizar en las primeras turbinas eólicas. Debido a la gran diferencia de giro entre el eje del molino y el generador se necesita una caja de cambios. Se llaman turbinas de viento de velocidad constante, aunque el generador de inducción de jaula de ardilla permita pequeñas variaciones en la velocidad del rotor (aproximadamente el 1 %). Un generador de jaula de ardilla consume la potencia reactiva de la red. Esto no es algo deseable, sobre todo en una red débil. Por esta razón, se acoplan condensadores al generador.

Los otros dos sistemas de generación permiten un factor de multiplicidad de 2 entre la velocidad mínima y máxima del rotor. Al existir estas variaciones en los niveles de velocidad de giro, existe un desacoplamiento entre la frecuencia de red y la frecuencia del rotor. Para igualar ambas frecuencias se necesita electrónica de potencia.

En los generadores de inducción doble-alimentados se utiliza un primer concepto de velocidad variable. A través de la electrónica de potencia, se inyecta una corriente en el devanado del rotor del generador. El devanado del estator del generador está conectado directamente a la red. La frecuencia de la corriente inyectada en el devanado del rotor es variable, por ello quedan desacopladas las frecuencias eléctricas y mecánicas. Al hacerse esto, se permite el funcionamiento con velocidades variables. Una caja de cambio adapta las diferentes velocidades del rotor y el generador.

Los generadores sincrónicos usan un segundo concepto de velocidad variable. Estas turbinas no tienen una caja de cambio. El generador y la red quedan totalmente desacoplados mediante electrónica de potencia. En esta configuración, también se puede operar con velocidades variables. Algunos fabricantes usan generadores especiales que operan con bajas revoluciones. Los generadores con bajas velocidades de giro se reconocen fácilmente por sus diámetros relativamente grandes, colocados cerca del rotor de la turbina.

## **Sistema de frenado**

Las turbinas eólicas están equipadas con sistemas de seguridad muy avanzados. El sistema de frenado de discos permite, en situaciones de emergencia o de mantenimiento, parar el molino.

## **Sistema de control**

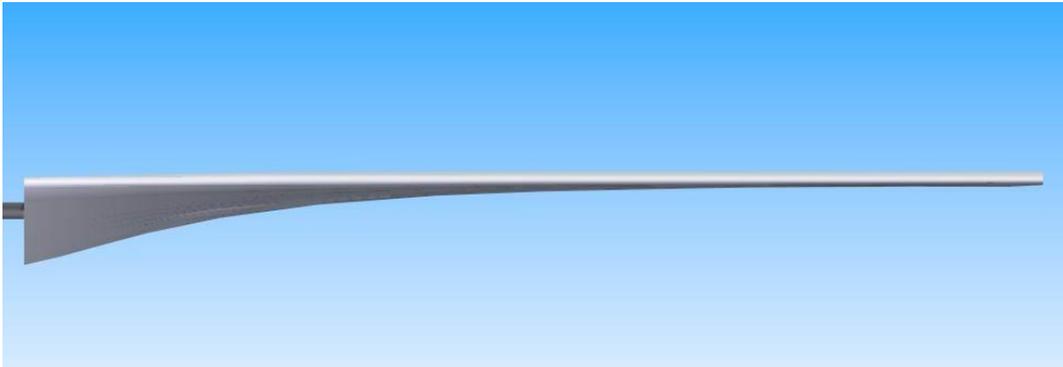
Una vez puesto en marcha un molino eólico, queda totalmente automatizado con sistemas de control formado por ordenadores. Estos manejan la información que suministran la veleta y el anemómetro colocados encima de la góndola para orientar el molino y las palas de forma que la

generación se optimice lo máximo posible. Toda la información sobre el estado de la turbina se puede enviar de forma remota a un servidor central.

## 7.4. Palas

---

Las palas del aerogenerador son estructuras compuestas y complejas de hasta 75 metros de longitud, son unas de las partes más importantes por no decir la más importante ya que son las encargadas de recoger la energía del viento, convertir el movimiento lineal de este en un movimiento de rotación, esta energía es transmitida al buje, del buje pasa a un sistema de transmisión mecánica y de ahí al generador que transforma el movimiento de rotación en energía eléctrica. El diseño de las palas es muy parecido al del ala de un avión.



**Figura 7.4.-** Pala de aerogenerador.

### 7.4.1. Fabricación

---

El proceso de fabricación de las palas es laborioso principalmente por los tamaños con los que se trabaja como se puede apreciar en la Figura 7.5.



**Figura 7.5.-** Proceso de fabricación de una pala

Las palas generalmente están construidas por una estructura central resistente más dos cubiertas exteriores que forman el perfil aerodinámico, de forma alabeada y anchura decreciente hacia la punta en dirección axial.

Los requisitos que debe cumplir la pala para que todo este correcto son:

- Tener una resistencia estructural adecuada a las condiciones de trabajo a las que va a ser sometida.
- Resistencia a fatiga (en particular a tensiones alternas debidas a vibraciones).
- Rigidez.
- Peso bajo.
- Facilidad de fabricación.
- Resistencia a agentes medioambientales.

Los materiales más empleados son:

- **Aleaciones de acero y de aluminio**, que tienen problemas de peso y de fatiga del metal, respectivamente, son actualmente usadas sólo en aerogeneradores muy pequeños.
- **Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster**, se emplea para la mayoría de las modernas palas de rotor de grandes aerogeneradores.
- **Fibra de vidrio reforzada con resina epoxy ("GRP")**, en forma de láminas preimpregnadas. Las palas son más ligeras, tienen mayor flexibilidad y menor deformación bajo temperaturas extremas y además presentan una excelente resistencia a la absorción de agua.
- **Fibra de carbono o aramiditas (Kevlar 29 o Kevlar 49)** como material de refuerzo en tiras por sus buenas propiedades mecánicas. Las propiedades que aporta son alta resistencia específica y palas muy ligeras, éstas suelen ser antieconómicas para grandes aerogeneradores.
- **Mixtos fibra de vidrio-fibra de carbono.**
- **Materiales compuestos** de madera, madera-epoxy, o madera-fibra-epoxy, pero aún no han penetrado en el mercado de las palas de rotor, aunque existe un desarrollo continuado en ese área.

#### 7.4.2. Ensayos realizados a las palas

---

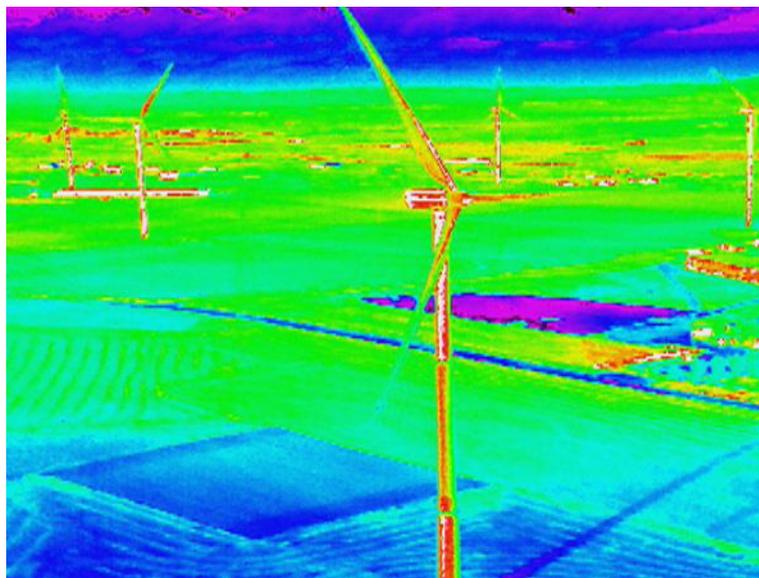
A continuación se indican los principales ensayos realizados sobre las palas

**Test a estática:** las palas son sometidas a cargas extremas durante un tiempo predeterminado (10-15 segundos), para probar su resistencia a la rotura: son flexionadas en dos direcciones (flapwise y edgewise) utilizando un ciclo próximo a la frecuencia natural de la pala en cada dirección. El movimiento flapwise se corresponde con la deformación que se produce en las palas en el sentido fore-aft de la torre, que es el balanceo que tiene esta desde la parte trasera a la parte delantera. Por el contrario, el movimiento edgewise se corresponde con la deformación que en las palas en el sentido side-to-side de la torre que consiste en el balanceo de ésta de izquierda a derecha.

**Test dinámico:** se somete a la pala a oscilaciones correspondientes con su frecuencia natural: cinco millones de ciclos respecto de los dos ejes principales. Durante las pruebas una cámara de infrarrojos de alta resolución se usa para chequear si hay pequeñas roturas en el laminado de la pala y se registran las medidas de deformación procedentes de galgas extensiométricos colocadas sobre la superficie de la pala.

**Test de rotura:** cuando se usa un nuevo material o se ha realizado un cambio significativo en el diseño de la pala, se realiza adicionalmente un test de rotura, que no es más que llevar el test estático al caso extremo, aplicando una carga estática creciente en valor hasta lograr que la pala rompa, realizando los análisis posteriores de la superficie de fractura.

**Inspección con infrarrojos (Termografía)** se utiliza para revelar un aumento de calor local en la pala, mediante este ensayo se puede detectar un área con humedecimiento estructural, un zona de delaminación o una que se está moviendo hacia el punto de rotura de las fibras.



**Figura 7.6.-**Vista termográfica de aerogenerador.

## **7.5. Principales averías y daños**

---

### **7.5.1. Pequeñas averías**

---

Normalmente las averías que se dan en los aerogeneradores suelen ser pequeñas averías que se pueden arreglar en poco tiempo, menos de 24 horas, principalmente debidas a:

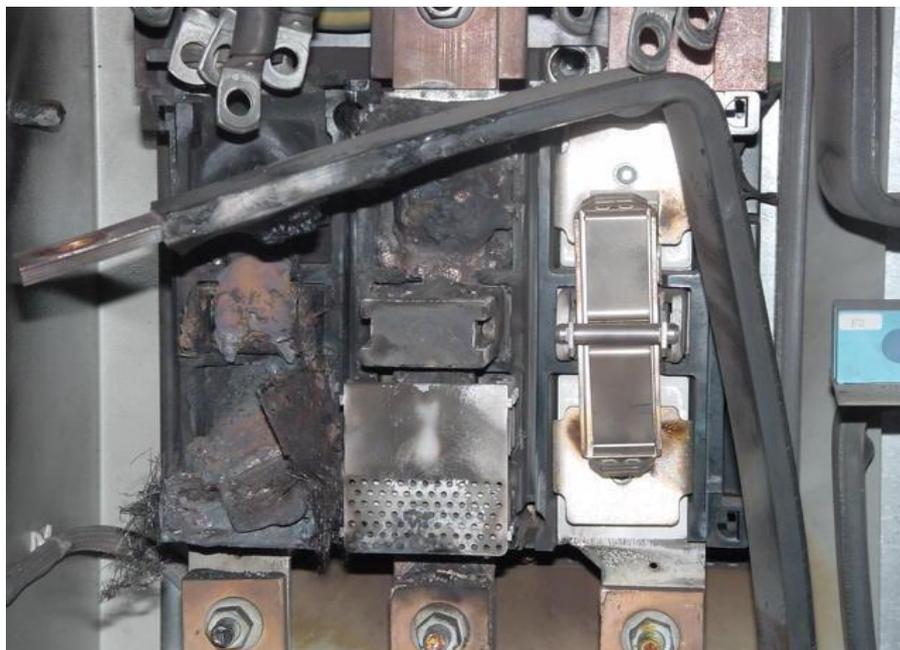
- Condiciones de operación.
- Mala reparación de un componente.
- Fallo de calidad o diseño del componente.
- Fallo humano.
- Rearme local por seguridad del aerogenerador, al detectarse vibraciones extrañas, presiones inseguras, exceso de temperaturas o torsión de cables.
- Rearme remoto ocasionalmente debo a fallos de lectura o funcionamiento temporal.

#### **7.5.1.1. Alarmas eléctricas**

---

Las averías y alarmas eléctricas que más se suelen dar son fallos en los instrumentos de medida como son el anemómetro, la veleta, los sensores de temperatura, velocidad, vibración y presión. Las posibles causas que los originan son:

- Por un aviso real de la alarma.
- Por un mal ajuste del sensor.
- Por desajuste del sensor por el funcionamiento.
- Por condiciones adversas (temperatura, climatología, etc.)



**Figura 7.7.-** Equipo eléctrico quemado.

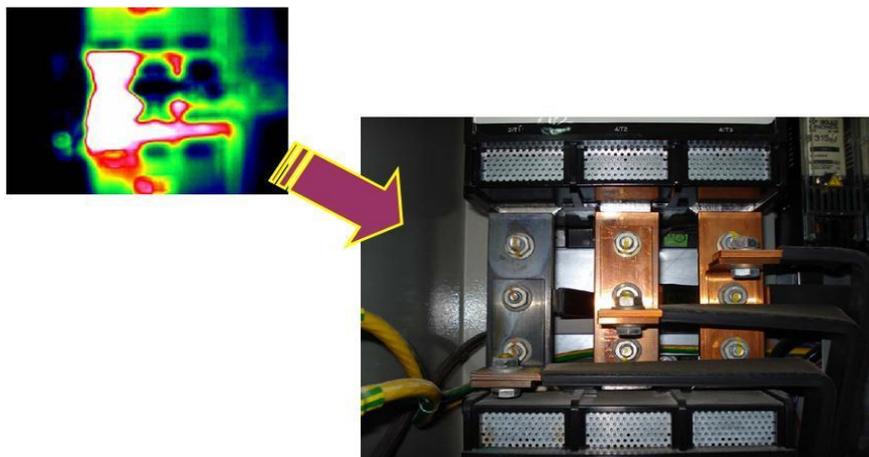
#### **7.5.1.1.1. Equipo de maniobra**

---

El aparellaje de maniobra es otro de los componentes eléctricos que puede fallar. Está compuesto por contactores, relés, magneto-térmicos, electro válvulas... Las causas que pueden conducir al fallo son:

- Fallo por fatiga del componente.
- Mal conexionado de los cables.
- Consecuencia de otras alarma.
- Fallo súbito (disparo de línea, tormenta eléctrica).
- Desgaste de las escobillas.
- Mala transmisión por suciedad.
- Derivación por humedad.
- Mal Reapriete del conexionado.
- Contacto defectuoso.
- Exceso de maniobras.
- Mal conexionado.

En los equipos eléctricos es importante realizar termografías ya que se pueden detectar puntos calientes que podrían derivar en fallos y averías en un futuro.



**Figura 7.8.-** Termografía de un equipo eléctrico.

#### **7.5.1.1.2. Protección de rayos**

---

Después de una avería por tormenta eléctrica hay que inspeccionar todo el sistema eléctrico y anti-rayos para buscar posibles averías provocadas por el rayo que puede que haya estropeado instrumentos del aerogenerador, por lo que los principales elementos a revisar son:

- Protector de rayos generador.
- Protector de rayos.
- Panel eléctrico.
- Rodamiento principal.
- Palas.



**Figura 7.9.-** Rayo en un aerogenerador.

#### **7.5.1.1.3. Motores o ventiladores**

---

Las averías que sufren motores y ventiladores eléctricos están relacionadas con:

- Sobre intensidad por funcionamiento.
- Derivación entre fases.

- Problemas de rodamientos.

#### **7.5.1.1.4. Electrónica de control y potencia**

---

Las averías que se dan en controladores, módulos de control y comunicación, tiristores... son debidas normalmente a:

- Fallo en el encadenado de componentes.
- Sobretensiones e intensidades de la línea.
- Baja calidad de los componentes.
- Tormentas eléctricas.

#### **7.5.1.2. Mecánico/hidráulicos**

---

Son fallos que se dan en sistemas mecánico-hidráulicos, principalmente por la degradación del aceite. Suelen aparecer en las siguientes partes:

- Generadores: sobrecalentamiento por falta de engrase o humedad en los rodamientos o falta de refrigeración en los bobinados.
- Multiplicadora: retenes dañados, mal conexionado en la refrigeración hidráulica y filtros.
- Sistemas hidráulicos: Fugas y contaminación de aceite.
- Bombas.

##### **7.5.1.2.1. Hidráulicas**

---

Las principales averías que se dan en el sistema hidráulico son:

- Bloqueo de componentes.
- Degradación y rotura.
- Fugas en el circuito.

Suelen ser debidas a:

- Aceite contaminado
- Rotura mecánica del componente.
- Mala reparación del sistema.
- Sobrecarga del sistema.



**Figura 7.10.-** Manguito degradado.

### **7.5.1.2.2. Conexionado y sellado**

---

Para evitar problemas durante el transporte y el montaje, todos los orificios deben ser sellados de manera segura. Todos los orificios y componentes expuestos deben ser cubiertos inmediatamente después del desmontaje y los latiguillos deben ser tapados tras su desconexión.

Las fuentes de contaminación suelen ser generalmente las siguientes:

- Bombas, tienden a machacar las impurezas, haciendo la situación más grave.
- Tapa superior del tanque, el aceite se puede contaminar si el sellado es incorrecto.
- Desgaste del sistema, el desgaste de piezas móviles (bombas y válvulas) conlleva la creación de partículas metálicas.
- Sistemas nuevos, en ocasiones partículas metálicas, pintura, etc., provenientes de la mecanización pueden contaminar todo el sistema.
- A través del filtro de aire, agua en suspensión puede colarse junto con el aire y pasar a mezclarse con el aceite o condensarse en el tanque.
- Juntas del cilindro, se desgastan con el paso del tiempo, contaminando el aceite.

Las partículas que podemos encontrar en el aceite dependiendo de su tamaño nos podrán ocasionar uno u otro tipo de daño, a continuación se detalla los daños según su tamaño.

- Partículas mayores de 40  $\mu\text{m}$  causan averías cuando se quedan atascadas en válvulas o bloquean líneas de pilotaje o válvulas de corredera.
- Partículas entre 25 y 40  $\mu\text{m}$  causan fallos intermitentes ya que pueden bloquear líneas de pilotaje y correderas de válvulas.
- Partículas menores de 25  $\mu\text{m}$  desgastan prematuramente todos los componentes del sistema. No suelen provocar bloqueos.

### **7.5.1.2.3. Oxidación y acumulación de insectos**

---

Durante la operación normal, el aceite está expuesto a condiciones que pueden descomponerlo por oxidación. Se debe al calentamiento y al batido del aceite en presencia de aire, catalíticos metálicos o agua. Los ácidos orgánicos que son solubles en el aceite e insolubles al agua aparecen tras la oxidación. Esto hace que los componentes del sistema queden expuestos a un riesgo de corrosión todavía mayor, la oxidación puede conllevar la formación de barros que pueden formar depósitos en conducciones y componentes.



**Figura 7.11.-** Óxido en partes de un aerogenerador.

Otro posible daño es la acumulación de insectos en diferentes partes de un aerogenerador, cuando las nubes de insectos alcanzan el área barrida por el rotor, las palas impactan contra ellos acumulándose los restos en el aerogenerador, principalmente en el borde de ataque lo que produce un aumento en la rugosidad de la pala perjudicando así a la eficiencia aerodinámica.



**Figura 7.12.-** Pala con restos de insectos y erosión con oxidación en superficie.

#### **7.5.1.2.4. Presencia de aire en el aceite**

---

Las burbujas de aceite se dan a menudo si el depósito es pequeño en relación con la demanda de aceite del sistema. Las burbujas no tendrán tiempo de flotar hacia la superficie y dejará el aceite antes de ser succionadas de nuevo por la bomba. También puede entrar aire al sistema a través de bombas deterioradas o conducciones rajadas. A menudo se introduce aire en el sistema al reemplazar algún componente. El aire puede eliminarse mediante un sangrado o purgado. La presencia de aire en grandes cantidades puede dar lugar a la destrucción de las bombas por el efecto de cavitación.

Al presurizar las burbujas de aire, éstas explotan, provocando que el aceite implosione rápidamente creando presiones de hasta 400 bares, si la implosión tiene lugar cerca del cuerpo de la

bomba se podrán producir daños en la misma. Una bomba puede quedar totalmente inutilizada tras pocos minutos de funcionamiento con cavitación.



**Figura 7.13.-** Presencia de aire en el aceite.

## **7.5.2. Grandes averías**

---

Las grandes averías ocurren en pocas ocasiones, pero debido a su gravedad pueden parar el aerogenerador durante mucho tiempo, ya que afectan directamente a componentes principales y a sus elementos como son: la multiplicadora, el generador, el transformador, las palas, los sistema giro. El coste de las averías es elevado de reparar, ya que provocan pérdidas de producción y se suelen necesitar máquinas y herramientas especiales como son grandes grúas, y personal cualificado.

El fallo puede deberse a:

- Condiciones de funcionamiento.
- Mal funcionamiento del componente.
- Fallo de calidad o diseño del componente.
- Fallo humano.

### **7.5.2.1. Eléctricas**

---

Las grandes averías que más se suelen dar son principalmente eléctricas y se dan en los siguientes componentes:

- Generador: Por defecto de aislamiento, mal conexionado en el bornero o falta de aislamiento en el estator.
- Transformador: Por sobrecalentamiento por falta de refrigeración, falta de aislamiento, o mal conexionado.

### **7.5.2.2. Mecánicas**

---

En la multiplicadora las principales averías que se pueden dar son las relacionadas con la degradación y rotura de las ruedas dentadas y los piñones, con los rodamientos por falta de lubricación principalmente o por que se han introducido objetos extraños que han provocados daños,

averías o desgaste, también pueden ser provocadas por fatiga por flexión o por contacto, y por deformación plástica.



**Figura 7.14.-** Degradación de ruedas dentadas.

En las palas las principales averías que se dan son las relacionadas con problemas en los rodamientos de las palas, daños en las palas como son grietas y fisuras estructurales e impactos de rayos.



**Figura 7.15.-** Daños provocados por un rayo.

Además, en las palas es común encontrarse las siguientes averías

- Falta de engrase.
- Contaminación de la grasa (hidráulico, agua).
- Vibraciones.
- Mal dimensionado del rodamiento.
- Ajuste del ángulo.
- Daños estructurales de diseño.
- Impacto de aves.

Generalmente las averías mecánicas suelen producirse por el desgaste de las piezas cuando están mal lubricadas o sometidas a sobre esfuerzos, en la siguiente tabla se indican las principales averías, así como las posibles causas que lo provocan.

<b>Avería</b>	<b>Causa</b>
Desgaste por rodadura Micropicaduras/coloración gris	Viscosidad insuficiente No usar lubricante seco, limpio o refrigerado
Eliminación de la capa dura en el rectificado	Insuficiencia capa primaria
	Excesivo proceso de rectificado
Marca de presión	Excesivo tiempo con el rotor bloqueado Falta de previsión con trabajos de larga duración
Rotura por causa de otro componente	Falta de lubricación
Desconchado	Turbina bloqueada por largo periodo
Óxido	Falta de programa de preservación
Aceite contaminado	Daños en los rodamientos Daños en el circuito de refrigeración

**Tabla 3.-** Principales averías mecánicas y sus posibles causas.

## 8. Instrucciones para el piloto

---

Una vez realizados los controles de seguridad y se garantice que tanto la aeronave como el personal no corren peligro alguno, se procederá a la inspección del aerogenerador con el dron para la toma de imágenes para su posterior estudio. Para ello, el piloto realizará la grabación y hará imágenes simultáneamente conforme va recorriendo el aerogenerador a una separación entre tres y diez metros de este, empezando ascendiendo por la parte frontal la torre, y continuando por las palas, donde una vez que llegue al buje, recorrerá cada pala por el intradós y extradós, antes de comenzar a analizar la palas, realizará una serie de fotografías por la zona del rotor. En las palas, se realizará la inspección por el intradós mientras que el dron se desplaza desde el buje hasta el extremo de la pala, y por el extradós mientras que el multicoptero vuelve hasta la parte central. A continuación, se hará una segunda inspección igual que la anterior, para esta vez prestando especial atención al borde de ataque y de fuga. Una vez inspeccionadas las tres palas el dron se desplazará hacia la parte de atrás del aerogenerador y descenderá inspeccionando la torre por su parte trasera.

El piloto deberá hacer una revisión exhaustiva, pues con esta inspección se pretende analizar la estructura exterior de un aerogenerador para detectar daños como los que se indicaron en el apartado anterior como fisuras, campos de tensiones o grietas debidos por ejemplo a un rayo, zonas oxidadas, o zonas con acumulación de restos de insectos o erosión por las partículas que arrastran las tormentas con oxidación en la superficie. También se pueden detectar grietas térmicas, fugas de fluidos hidráulicos o delaminación en partes de alguna de las palas.

Aun así, durante la inspección, el piloto deberá hacer especial hincapié en algunas zonas ya que son las más propensas a sufrir algún defecto como son la cimentación y la torre, pues el piloto deberá fijarse en las grietas de fundación y los pares de apriete, mientras que en las palas hay que hacer hincapié en las fisuras y marcas de grietas, decoloraciones y rugosidades y en el borde de ataque y salida. En la unión pala-buje, hay que fijarse en dicha unión por si se detectase alguna anomalía. Detectar los problemas en las fases iniciales y solventarlos a bajo coste sin desmontar las palas es el criterio más sensato, antes de tener que lamentar males mayores, además de que se garantizará una mayor eficiencia y producción energética. Pues la aparición de grietas, rupturas, agujeros y despegados son frecuentes, su reparación es tan costosa que una mala gestión puede echar por tierra la rentabilidad de todo un proyecto de parque eólico.

En la actualidad, la forma de obtener los resultados más interesantes es mediante el empleo de drones gracias a la proximidad a la pala a que se realiza el vídeo, la colocación precisa de lentes luminosas y el empleo de cámaras de alta resolución.

## 9. Procedimiento a seguir para hacer un estudio de los defectos en las palas de un aerogenerador.

---

Como hemos estado viendo durante todo el trabajo, el uso de drones para realizar la inspección de los diversos componentes de un aerogenerador y sus palas, es la evolución lógica de los medios utilizados hasta ahora para realizar un adecuado mantenimiento preventivo de estas instalaciones, utilizando cámaras de ultra alta definición. La inspección del parque eólico, que deberán realizar los pilotos arriba mencionados, consta, de dos fases:

- Realización de imágenes durante el vuelo:

Se recopilará información a través de las grabaciones obtenidas por las cámaras de videograbación para posteriormente, en la siguiente fase analizarlas.

- Realización de informes con respecto a los defectos detectados:

Después de haber realizado la captura de imágenes desde las distintas perspectivas de las palas del aerogeneradores, se procederá por expertos técnicos a analizar los defectos de las palas de los aerogeneradores, analizando y realizando un informe individual de cada uno de los aerogeneradores, a la vez que un informe general del parque eólico, reseñando el tipo de daño identificado; así como la localización del mismo en la pala, estableciendo una serie de recomendaciones al respecto, atendiendo a la gravedad del defecto o daño que presente.

Estos informes proporcionarán información necesaria y minuciosa con el objeto de realizar un mantenimiento preventivo y correctivo de las turbinas, reduciendo tiempo, costos y riesgos para los operarios y mejorando la calidad del análisis siendo una de las tecnologías más eficaces.

A la hora de realizar esta operaciones contaremos con otra persona que realizará las labores de observador, estará encargada de no perder de vista el RPAS en ningún momento, además de ayudar al piloto a los mandos indicando cualquier objeto que pueda interferir con la aeronave o cualquier cambio meteorológico que ponga en peligro la operación.

Dicho estudio se plasmará en una tabla como la que se muestra a continuación añadiéndola a una base de datos informática. Inicialmente se rellena el nombre de la persona que realiza la inspección, así como la fecha de la inspección y de la última realizada y las condiciones atmosféricas en las que se realiza el estudio como se muestra en la Tabla 4. La Tabla 5 es la que se utiliza para realizar dicho estudio, en ella se indica el aerogenerador, pues cada uno tiene un número asignado y su localización (latitud y longitud). También se indica la posición del defecto, en qué parte del aerogenerador se encuentra, de que daño se trata y la distancia al centro a la que se encuentra, considerando éste como el punto donde unen las palas. Además, se señala el minuto de la grabación donde se detecta el defecto por si alguien quiere visualizarlo posteriormente con más detalle. Además se indica la importancia y urgencia del defecto encontrado en una escala de 1 a 5, siendo 1 la calificación de control sin necesidad de actuación inminente y siendo 5 grave, reparación inmediata.

<b>Inspector</b>	José García García
<b>Fecha de inspección</b>	15/09/2017
<b>Última inspección</b>	15/03/2017
<b>Condiciones</b>	30° C 33% Humedad

Tabla 4.- Datos de inspección

Estudio de los daños detectados							
Turbina	Latitud/longitud	Situación	Zona	Minuto	Daño	Gravedad	Distancia al centro(m)
3	34,45895/-100,67700	Pala	Extradós	2:35	Deslucimiento pintura	1	7,1
9	41,73383/-100,44922	Torre	Frente	1:05	Acumulación de insectos	2	5,3
9	41,73383/-100,44922	Pala	Borde de ataque	0:48	Fractura	5	11,8
15	33,45529/-1007,07943	Pala	Intradós	3:41	Oxidación	3	4,2
18	38,554350/-103,93930	Pala	Borde de fuga	1:36	Zona quemada y fracturada	5	3,7

**Tabla 5.-** Estudio de los defectos de un aerogenerador.

En general, de los diferentes daños producidos en los aerogeneradores, el más común en las palas es la erosión del borde de ataque, como consecuencia del paso del tiempo, también se observan grietas en el borde de ataque y daños también sufridos por rayos, siendo fácil de detectar por los silbidos de las palas durante la rotación. Los rayos, siguen siendo un motivo principal por el cual son una fuente importante de pérdidas, aunque últimamente se están dotando a los aerogeneradores de modernos sistemas de protección con el fin de interceptar y transmitir el rayo de manera eficaz y segura hacia las otras partes del sistema de protección del aerogenerador. Otro daño que se observan es en el acoplamiento y soldadura de las palas donde se observan desconchados y algunas erosiones en la capa superficial de las palas, con oxidación debido a las distintas lluvias torrenciales y a la humedad de la zona. También en algunas palas se aprecian daños como consecuencia del impacto con aves o especies que vuelan, puesto que no debemos de olvidar el impacto negativo que crean los aerogeneradores, sobre la naturaleza, cuando golpean especies de distintas aves que vuelan por la zona de rotación así como el roce del viento con las aspas, conllevando erosiones y desconchados en las palas, dando lugar a una oxidación de forma constante.

## 10. Conclusiones.

---

El presente Trabajo Fin de Grado, tal y como se ha enunciado en la introducción, ha estado enfocado en la definición y puesta en funcionamiento del protocolo de seguridad operacional para el control de calidad en grandes aerogeneradores con drones, para intentar realizar un plan de mantenimiento de los parques eólicos.

En primer lugar, durante la fase de selección del dron a utilizar se ha podido comprobar la variedad de drones que existen en el mercado, finalmente se escogió el DJI Matrice 200 TDK. Además de tener una visión global del modelo, es muy importante tener una visión específica de cada uno de sus componentes, tanto en dimensiones como en forma, para un correcto estudio posterior de los riesgos que pueden producir.

También resulta de vital importancia asegurarnos de la viabilidad de la operación previa a su ejecución, de ahí a la realización del informe que recopila los posibles inconvenientes o peligros a los que nos podemos enfrentar para discutir si el proyecto a poner en marcha es factible. Además de conocer qué medidas poner en marcha para prevenir cualquier accidente.

Dado el tipo de trabajo, a priori parece que la inspección de los aerogeneradores sea el punto más importante, no hay que restar importancia a los demás apartados, pues creo que es imprescindible conocer los peligros que pueden derivar de esta operación y las medidas para evitarla. Así como las partes y el funcionamiento de lo que en definitiva, vamos a inspeccionar, los aerogeneradores.

De esta manera, he de decir que me llena de satisfacción haber realizado este proyecto por todo lo conseguido durante su elaboración y por los hitos conseguidos durante su proceso. Desde el punto de vista personal ha sido un trabajo muy enriquecedor, no solo por la capacidad de utilizar muchos de los conocimientos adquiridos previamente a lo largo de la carrera, sino por lo nuevo aprendido.

En definitiva, ha sido un trabajo muy dinámico, donde cada una de las fases puede que difiera con respecto a las otras, pero además se ha combinado el estudio teórico y su aplicación en la vida real.

## 11. Bibliografía

---

- [1] Aerofilming. “<https://www.youtube.com/watch?v=cTRaOH-ZJ6Y>”. Inspección aerogenerador con drones.
- [2] Drone Service. “<https://www.youtube.com/watch?v=XEoYqtQRfqQ>”. Toma de imágenes con drone.
- [3] TÜV Rheinland. “<https://www.tuv.com/spain/es/certificaci%C3%B3n-de-aerogeneradores.html>”. Certificación del tipo y de componentes.
- [4] Becerra y Corral Asociados. “<https://www.youtube.com/watch?v=2s9erJwAK1c>”. Uso de drones en parques eólicos
- [5] Windpower. “<http://www.windpowerengineering.com/maintenance/tools-and-equipment/self-flying-drones-wind-turbine-blades-inspections-15-minutes/>”. Inspección de aerogeneradores.
- [6] FRANCISCO DE PAULA BARCO. Montaje y mantenimiento mecánico de parque eólico, 2011. Editorial vértice.
- [7] Drone system. “<https://www.youtube.com/watch?v=nilzIMLm0r4>”. Inspección aerogenerador.
- [8] Navigant. <https://www.navigantresearch.com/research/drones-for-wind-turbine-inspection> Drones para la inspección de aerogeneradores.
- [9] Drone tolos. “<https://www.youtube.com/watch?v=sCtD2yGdrdc>”. Inspección para eólica.
- [10] Skydron. <https://www.skydron.es/revision-plantas-fotovoltaicas-termicas-con-drones/>. Revisión de aerogeneradores con drones.
- [11] Zenith drones. “<https://www.youtube.com/watch?v=JNeP4q5ZNGE>”. Inspección eólica mediante un dron.
- [12] Trabver. “[https://www.youtube.com/watch?v=U\\_pWYGJm6FU](https://www.youtube.com/watch?v=U_pWYGJm6FU)”. Reparación de palas de aerogenerador.
- [13] MIGUEL VILLARUBIA LÓPEZ. Ingeniería de la energía eólica, 2011. Editorial marcombo
- [14] Eurocontrol. “<http://www.eurocontrol.es/eficiencia-energetica/servicios/inspeccion-de-palas-de-aerogeneradores-con-drones/>”. Inspección de palas de aerogeneradores con drones.
- [15] DJI. <http://www.dji.com/es/matrice-200-series>”. Serie matrice 200.
- [16] RAFAÉL AVILÉS. Análisis de fatiga en máquinas, 2005. Ediciones Paraninfo.
- [17] RICHARD BUDYNAS Y KEITH NISBETT. Diseño de ingeniería mecánica deshigley, 2012. Editorial Mc Graw Hill
- [18] BOE. [http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/B49195BC-FCDD-4EF6-947C-1037404528D9/127506/Ley\\_48\\_1960.pdf](http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/B49195BC-FCDD-4EF6-947C-1037404528D9/127506/Ley_48_1960.pdf). Ley 48/1960, de 21 de Julio, sobre Navegación Aérea.
- [19] RUSSELL C. HIBBELER. Mecánica de materiales, 1997. Editorial Plearson.

- [20] ADAM NIESLONY. Rainflow Counting Algorithm, 2003. Editorial McGill
- [21] R.P.L. NIJSSEN. Fatigue Life Prediction and Strength Degradation of Wind Turbine Rotor Blade Composites, 2007.
- [22] NEVILLE W. SACHS. Practical plant failure analysis, 2006. Editorial Traylor & Francis.
- [23] Endesa. “[http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiii.-las-centrales-eolicas](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiii.-las-centrales-eolicas)”. Parques eólicos.
- [24] BladeCleaning “<http://www.bladecleaning.com/problematika.htm>” Acumulación de insectos en las palas