



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y desarrollo de un sistema de diagnóstico de aerogeneradores basado en drones

Autor: Javier Urdiain Hernández

Director: Emilio Manuel Domínguez Adan

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño y desarrollo de un sistema de diagnóstico de aerogeneradores basado en drones
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Javier Urdiain Hernández

Fecha: 12/07/22

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Emilio Manuel Domínguez Adán

Fecha: 12/07/22



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y desarrollo de un sistema de diagnóstico de aerogeneradores basado en drones

Autor: Javier Urdiain Hernández

Director: Emilio Manuel Domínguez Adan

Madrid

Diseño y desarrollo de un sistema de diagnóstico de aerogeneradores basado en drones

Autor: Urdiain Hernández, Javier

Director: Domínguez Adan, Emilio Manuel

Entidad colaboradora: ICAI-Universidad Pontificia Comillas

Resumen del proyecto

El propósito de este de este proyecto es el de analizar qué inspecciones puede realizar un dron en el mantenimiento de un parque eólico y cuáles son sus ventajas y desventajas. Además, hemos investigado qué aplicaciones tienen las cámaras termográficas y cómo nos pueden ayudar a la hora de realizar estas inspecciones.

Para ello, hemos analizado qué inspecciones son necesarias en un aerogenerador, incluyendo, tipos de mantenimiento, las técnicas tradicionales, la frecuencia en que hay que realizar estas inspecciones y los riesgos que conllevan.

Después hemos realizado una investigación de los diferentes tipos de drones que existen en el mercado para corroborar que existen modelos capaces de realizar este tipo de inspecciones y capaces de aguantar las condiciones climáticas adversas que existen en los parques eólicos. Así mismo, estudiamos el reglamento vigente respecto al uso de drones para saber qué licencias y requisitos son necesarios para realizar una inspección de un parque eólico con drones.

Dentro de todas las inspecciones necesarias en un aerogenerador, hemos estudiado cuáles de ellas se pueden realizar con un dron, llegando a la conclusión de que sólo serían capaces de inspeccionar la parte exterior del aerogenerador, incluyendo, torre, góndola y palas. Además de saber qué inspecciones serían capaces de realizar un dron, hemos

analizado de qué manera se podría realizar estas inspecciones, diferenciando 3 técnicas diferentes de inspección.

Una vez estudiado qué aplicaciones tienen los drones, hemos realizado una comparación tanto técnica como económica de las dos técnicas tradicionales, la inspección en altura y en tierra y la propuesta que hemos realizado de hacerlo con drones para conocer las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Al acabar todo nuestro estudio, llegamos a la conclusión de que realizar la inspección con drones sería lo óptimo para las empresas del sector eólico ya que es una técnica mucho más rápida, barata, segura y eficiente que las técnicas tradicionales.

Design and development of a drone-based wind turbine diagnostic system

Author: Urdiain Hernández, Javier

Supervisor: Domínguez Adan, Emilio Manuel

Collaborating Entity: ICAI-Universidad Pontificia Comillas

The purpose of this project is to analyze what inspections a drone can perform in the maintenance of a wind farm and what are its advantages and disadvantages. In addition, we have investigated what applications thermographic cameras have and how they can help us when carrying out these inspections.

To do this, we have analyzed what inspections are necessary in a wind turbine, including types of maintenance, traditional techniques, the frequency with which these inspections must be carried out and the risks they entail.

Then we have carried out an investigation of the different types of drones that exist in the market to corroborate that there are models capable of carrying out this type of inspection and capable of withstanding the adverse weather conditions that exist in wind farms. Likewise, we study the current regulations regarding the use of drones to know what licenses and requirements are necessary to carry out an inspection of a wind farm with drones.

Within all the necessary inspections in a wind turbine, we have studied which of them can be carried out with a drone, reaching the conclusion that they would only be able to inspect the outside of the wind turbine, including the tower, nacelle and blades. In addition to knowing what inspections a drone would be capable of carrying out, we have analyzed how these inspections could be carried out, differentiating 3 different inspection techniques.

Once we have studied what applications drones have, we have made a technical and economic comparison of the two traditional techniques, inspection at height and on the ground, and the proposal we have made to do it with drones to know the advantages and disadvantages of each of them.

At the end of all our study, we came up to the conclusion that carrying out the inspection with drones would be optimal for companies in the wind sector, since it is a much faster, cheaper, safer, and more efficient technique than traditional techniques.

Índice:

1	INTRODUCCIÓN	14
2	ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	16
3	ANTECEDENTES	18
3.1	ANTECEDENTES HISTÓRICOS PARQUES EÓLICOS	18
3.1.1	<i>Origen y evolución parques eólicos:.....</i>	<i>18</i>
3.2	ANTECEDENTES DRONES.....	23
3.2.1	<i>Origen y evolución de los drones</i>	<i>23</i>
3.2.2	<i>Tipos de drones actuales.....</i>	<i>30</i>
4	NORMATIVA EUROPEA UAS.....	38
4.1	¿CÓMO NOS AFECTARÍA LA NORMATIVA?	45
5	ESTADO DEL ARTE.....	46
5.1	LOCALIZACIÓN PARQUES EÓLICOS.....	46
6	MANTENIMIENTO DE UN PARQUE EÓLICO	48
6.1	PARTES DE UN AEROGENERADOR	48
6.2	PRINCIPALES AVERÍAS EN UN AEROGENERADOR.....	51
6.3	TIPOS DE MANTENIMIENTO DE UN AEROGENERADOR	52
6.4	NIVELES DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO Y PREVENTIVO.....	57
6.5	¿CUÁNDO SE REALIZA CADA TIPO DE MANTENIMIENTO?	60
6.6	TÉCNICAS DE INSPECCIÓN EXTERIOR EXISTENTES HOY EN DÍA EN PARQUES EÓLICOS:.....	61
6.7	PRINCIPALES FACTORES DE RIESGO EN EL MANTENIMIENTO DE UN AEROGENERADOR	65
7	PROPUESTA MEJORA MANTENIMIENTO DE UN PARQUE EÓLICO MEDIANTE EL USO DE DRONES Y CÁMARAS TERMOGRÁFICAS.....	71
7.1	APLICACIONES ACTUALES DE UN DRON	71
7.2	APLICACIÓN DE LOS DRONES EN LA INSPECCIÓN DE UN PARQUE EÓLICO.....	74
7.3	¿CÓMO SE HACEN ESTAS INSPECCIONES CON DRONES?	76
7.4	QUÉ CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS NECESITARÍA UN DRON PARA REALIZAR LA INSPECCIÓN DE UN AEROGENERADOR.....	79
7.5	CÁMARAS TERMOGRÁFICAS	81

7.5.1	<i>Tipos de cámaras termográficas.....</i>	82
7.5.2	<i>Aplicaciones actuales de la cámara termográfica</i>	84
7.5.3	<i>Aplicación de la cámara termográfica en el mantenimiento de un parque eólico</i>	86
8	COMPARATIVA DE LAS TRES TÉCNICAS DE INSPECCIÓN	88
9	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS TRES TÉCNICAS DE INSPECCIÓN	90
10	CONCLUSIONES	97
11	BIBLIOGRAFÍA	100

Índice de tablas:

TABLA 1 : COMPARATIVA DEL MOTOR BRUSHED Y BRUSHLESS.....	34
TABLA 2 : EJEMPLOS DE OPERACIONES DE CADA NIVEL Y TIPO DE MANTENIMIENTO.	59
TABLA 3 RESUMEN INSPECCIÓN EN TIERRA Y EN ALTURA.	65
TABLA 4 : FACTORES DE RIESGO EN LA GÓNDOLA, BUJE Y PALAS.	67
TABLA 5 : FACTORES DE RIESGO EN LA BASE Y TORRE.	68
TABLA 6 : VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS 3 TÉCNICAS DE INSPECCIÓN DE AEROGENERADORES CON DRONES.	78
TABLA 7 : RESUMEN INSPECCIÓN EN TIERRA, EN ALTURA Y CON DRONES.....	88
TABLA 8 : PRECIOS EN EUROS DE LA INSPECCIÓN EN TIERRA.....	92
TABLA 9 : PRECIOS EN EUROS DE LA INSPECCIÓN EN ALTURA.	93
TABLA 10 : PRECIO EN EUROS DE LA INSPECCIÓN CON DRONES.	94
TABLA 11 : PRECIOS MEDIOS EN EUROS DE CADA TÉCNICA DE INSPECCIÓN	95

Índice de Figuras:

FIGURA 1:	BARCO DEL IV O V MILENIO ANTES DE CRISTO	18
FIGURA 2:	TURBINA CREADA POR BRUSH ELECTRIC COMPANY. 1887	19
FIGURA 3:	TURBINAS EÓLICAS DE 4 Y 5 PALAS	20
FIGURA 4:	TRIPALA GEDSER	21
FIGURA 5:	PARQUE EÓLICO TOWARDS 2000	22
FIGURA 6:	BOMBARDERO EN VENECIA	23
FIGURA 7:	RADIO CONTROL DE NIKOLA TESLA	24
FIGURA 8:	UAV QUEEN BEE.....	25
FIGURA 9:	TORPEDO BQ-4/TDR.....	26
FIGURA 10:	COHETE V2	27
FIGURA 11:	RYAN FIREBEE.....	28
FIGURA 12:	GYRODYNE QH-50 DASH.....	29
FIGURA 13:	DRON DE ALA FIJA	31
FIGURA 14:	DRON DE ALA ROTATORIA	32
FIGURA 15:	MAPA DE LA LOCALIZACIÓN DE LOS PARQUES EÓLICOS EXISTENTES Y FUTUROS EN ESPAÑA	47
FIGURA 16:	ESQUEMA DE UN AEROGENERADOR.....	48
FIGURA 17:	NIVELES DE MANTENIMIENTO Y SU CORRESPONDIENTE ACCIÓN.....	58
FIGURA 18:	GRÁFICA TIEMPO-CONDICIÓN DE UN AEROGENERADOR	60
FIGURA 19:	INSPECCIÓN EN TIERRA.....	62
FIGURA 20:	INSPECCIÓN EN ALTURA	63
FIGURA 21:	REPRESENTACIÓN AEROGENERADOR CON PALA MIRANDO HACIA LAS 6 EN PUNTO	76
FIGURA 22:	REPRESENTACIÓN AEROGENERADOR CON PALA MIRANDO HACIA LAS 12 EN PUNTO	77

FIGURA 23:	REPRESENTACIÓN AEROGENERADOR CON UN POSICIONAMIENTO CON ÁNGULO FIJO	78
FIGURA 24:	DRON MATRICE 300 RTK - DJI	80
FIGURA 25:	CÁMARA TERMOGRÁFICA REFRIGERADA.....	82
FIGURA 26:	CÁMARA TERMOGRÁFICA NO REFRIGERADA.....	83
FIGURA 27:	FOTOGRAFÍA REALIZADA CON UNA CÁMARA TÉRMICA	87

1 Introducción

En la actualidad el desarrollo de las energías renovables se ha convertido en uno de los principales objetivos dentro de la política energética internacional como solución a las consecuencias existentes y futuras del cambio climático.

En el año 2021 las energías renovables produjeron el 46,6% de la electricidad de nuestro país siendo la energía eólica la principal fuente de generación con una representación del 23,3% de la energía total.

La energía eólica es aquella que se obtiene al transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica mediante un aerogenerador. Los aerogeneradores aprovechan este tipo energía para transformarla en energía mecánica mediante un rotor y posteriormente en energía eléctrica gracias a un generador.

España, actualmente, cuenta con 1.265 parques eólicos distribuidos en 1.037 municipios y con 21.419 aerogeneradores convirtiendo al país en la segunda potencia europea en el ranking de países con mayor potencia eólica instalada y en la cuarta potencia a nivel mundial.

No obstante, hoy en día el mantenimiento de los parques eólicos sigue siendo una actividad considerada peligrosa, lenta y cara. Muchos de los aerogeneradores que están activos no cumplen los requisitos de la ley de prevención de riesgos en las actividades de operación y mantenimiento de los aerogeneradores (O/M) debido a la temprana y rápida expansión de la energía eólica en el país.

A su vez, otro sector que ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años y que mayor impacto ha tenido en la sociedad e industria es el de los drones. Lo que nació como una aeronave militar, se ha convertido en una herramienta con miles de aplicaciones usada tanto en fines recreativos como profesionales como, por ejemplo, la vigilancia,

búsqueda y rescate de personas y diversas aplicaciones en la industria. Las empresas de varios sectores están desarrollando proyectos con drones apostando en la transformación hacia una industria más inteligente.

En los últimos años la industria eólica ha puesto un gran interés en investigar y aplicar nuevas tecnologías en el mantenimiento de aerogeneradores con el objetivo de mejorar el proceso.

Gracias al avance tecnológico de los drones y con el objetivo de reducir los costes y la peligrosidad del mantenimiento de los aerogeneradores, se analizarán las aplicaciones que podrán llevar a cabo los drones en el mantenimiento e inspección de los parques eólicos y su impacto en esta industria.

2 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) son un conjunto de objetivos acordados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) constituidos por 17 objetivos y 169 metas que abarcan las esferas económica, social y ambiental con el fin de transformar el mundo para el año 2030.

El proyecto se alinea principalmente con los objetivos número 3, 9 y 17:



Número 3: Salud y bienestar. Este objetivo se centra en garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades. Nuestro proyecto tiene como objetivo reducir al máximo los riesgos que conlleva el mantenimiento e inspección de un parque eólico mediante el uso de drones. La intención es que los trabajadores suban lo menos posible a los aerogeneradores y en vez de ello, se encarguen drones.

Número 9: Industria, innovación e infraestructura. Este objetivo se centra en descubrir soluciones duraderas para los desafíos económicos y medioambientales mediante la innovación y progreso tecnológico. El fin de este objetivo es promover nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional, permitir el uso eficiente de los recursos y generar nuevos empleos.



El uso de la creciente tecnología de los drones para el mantenimiento de un parque eólico es sin duda alguna, una innovación que hoy en día no se lleva a cabo.



Número 17: Alianza para lograr objetivos. Las empresas eléctricas tendrán que aliarse con las empresas de drones para llevar a cabo el proyecto. El proyecto requiere de la fabricación de drones y posteriormente de la habilidad de pilotarlos, capacidades que las empresas eléctricas carecen. A su vez, las

empresas eléctricas tendrán que contratar a una empresa que se dedique a analizar e interpretar los datos obtenidos por el dron.

3 Antecedentes

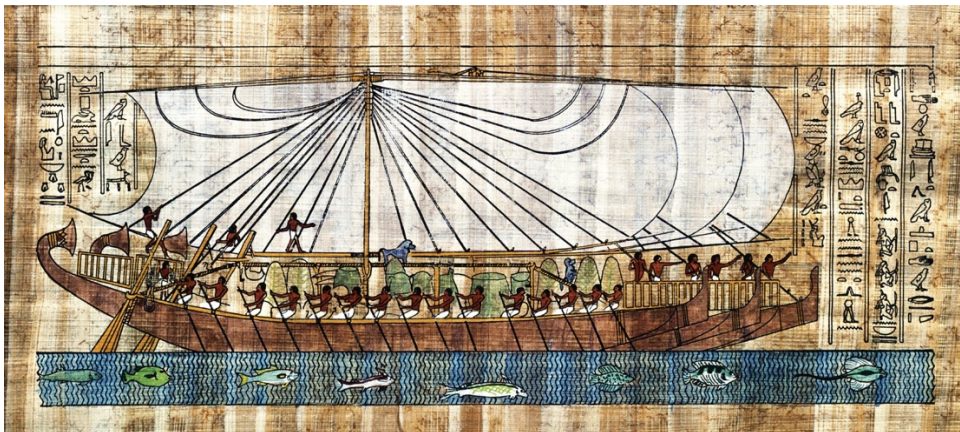
3.1 Antecedentes históricos parques eólicos

3.1.1 Origen y evolución parques eólicos:

Antes de centrarnos en los parques eólicos, es importante conocer los orígenes de la energía eólica, fuente de energía renovable que más se utiliza hoy en día y mayor crecimiento tecnológico ha tenido en las últimas décadas.

Desde nuestros conocimientos, los primeros registros sobre el aprovechamiento de la energía eólica fue en el IV o V milenio antes de cristo aplicada a la navegación. Posteriormente siglos antes de cristo, Persia, Irak, Egipto y China utilizaron máquinas eólicas que se basaban en un rotor vertical con varias palas de madera o caña que los usaban para bombear agua y triturar granos de cereales.

Figura 1: Barco del IV o V milenio antes de cristo



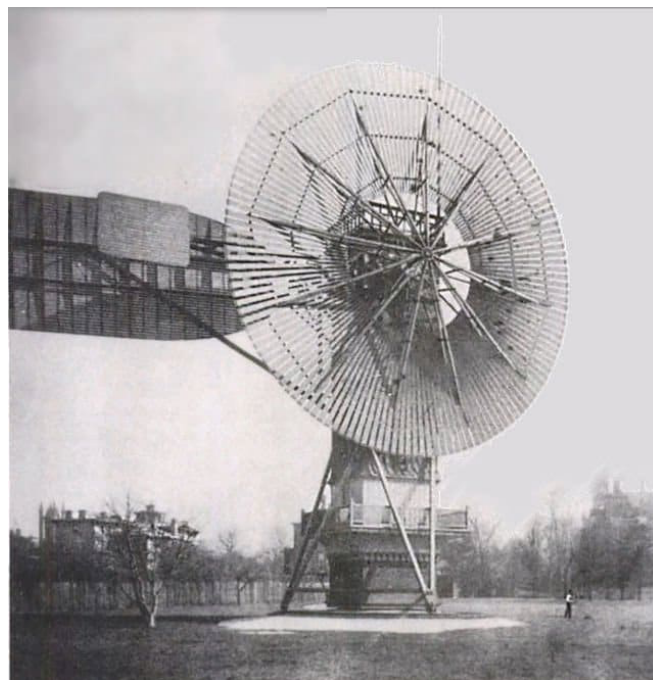
Fuente: www.naturgy.com

Siglos más tarde, en 1724, Leopold Jacob creó el molino de ocho palas cuya función era mover una bomba de pistón. A pesar de ello, el considerado pionero de la energía eólica fue Charles Francis Brush cuando en 1887 inventó lo que hoy se considera, la primera turbina eólica para generar electricidad.

Brush era un granjero que estudió ingeniería de minas en las Universidad de Michigan. En 1880 fundó Brush Electric Company donde fabricaba generadores para la central hidroeléctrica de St. Anthony Falls en Minneapolis y donde más tarde, en 1887, creó la primera turbina eólica americana con un rotor de 17 metros de diámetro y 144 palas de madera. La turbina era capaz de generar 12 KW y se mantuvo en funcionamiento durante 20 años.

La turbina creada por Brush tenía demasiadas palas y su eficiencia era muy baja. Y no fue hasta 1897 que se mejoró esta tecnología gracias a Poul la Cour.

Figura 2: Turbina creada por Brush Electric Company. 1887



Fuente: www.ecoinventos.com

Paul la Cour fue un meteorólogo danés y un apasionado del viento. Construyó su propio túnel de viento y usó sus propias turbinas eólicas de cuatro y cinco palas para obtener hidrógeno mediante la electrólisis. En 1904 fundó la Sociedad de Electricistas del Viento y gracias a sus esfuerzos consiguió que en el 1918 hubiera 120 empresas en Dinamarca que se alimentaran de energía proveniente de la energía eólica.

Figura 3: Turbinas eólicas de 4 y 5 palas



Fuente: www.historiainventos.com

En 1940 la compañía danesa F. L. Smidth empezó a fabricar aerogeneradores de dos y tres palas. Como podemos ver, los daneses fueron los pioneros de la evolución de la tecnología de la energía eólica.

En 1950, el ingeniero Johannes Juul, el cual fue alumno de La Cour, inventó un sistema para obtener corriente alterna de los aerogeneradores. Estos aerogeneradores se los conoce como tripala Gedser y eran capaces de generar 200 KW que comparados con los 12 KW que generaba el aerogenerador de Brush fue un avance enorme en este sector. La NASA utilizó este diseño para su programa de energía eólica.

Figura 4: Tripala Gedser



Fuente: www.docplayer.com

La crisis del petróleo en el 1970 cambió la forma de pensar del mundo entero e hizo que el mercado se interesara por las energías renovables. En Europa y Estados Unidos se empezaron a crear las primeras políticas de energía renovable y se empezó fomentar el desarrollo de la investigación de la energía eólica.

El primer proyecto de parque eólico se creó con la colaboración de la Nasa y el Departamento de Energía de los Estados Unidos en el 1981 pero no se llegó a terminar hasta el año 1997. Este parque eólico llamado Towards 2000 era capaz de generar alrededor de los 7500 KW.

Figura 5: Parque eólico Towards 2000



Fuente: www.naturgy.com

En el 1987, la empresa danesa Elkraft, comenzó con las investigaciones para instalar aerogeneradores en el agua y en el 1991 se empezó a construir el primer parque eólico offshore con un presupuesto de 10 millones de dólares bautizado como Vindeby Offshore Wind Farm. El parque eólico contaba con 11 aerogeneradores con una capacidad de generación total de 4,95 MW. Para hacernos un poco a la idea, hoy en día, existen aerogeneradores offshore que por sí mismos son capaces de generar entre 8-12 MW, el doble de potencia que los 11 aerogeneradores de Vindeby en conjunto.

Hoy en día la energía eólica representa un 23% de la producción total de energía en España con un valor de 27.446 MW repartidos en 1.298 parques eólicos con 21.574 aerogeneradores instalados. La eólica española es la quinta potencia mundial con mayor potencia instalada y la segunda a nivel europeo.

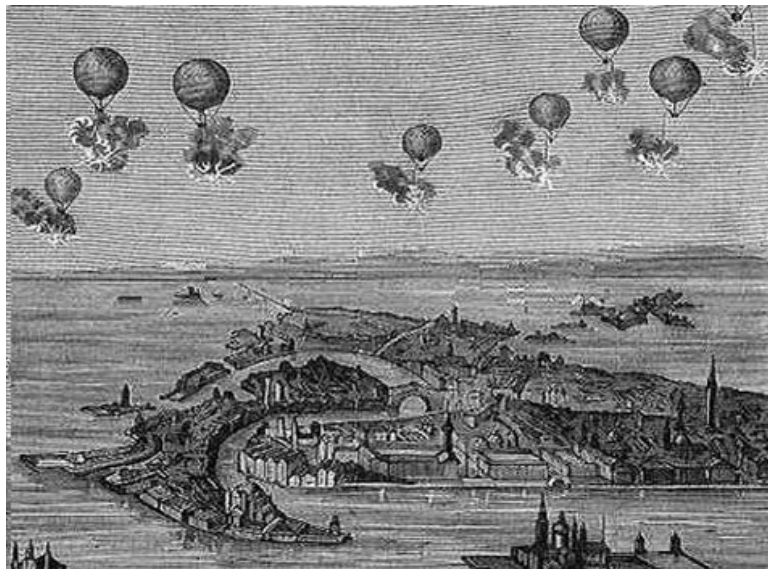
3.2 Antecedentes drones

Los drones son vehículos no tripulados capaces de volar de forma remota o autónoma con un nivel de vuelo controlado y sostenido. Existen varios tipos de drones y, a la vez, tienen un gran potencial en varios sectores de los cuales hablaremos más adelante.

3.2.1 Origen y evolución de los drones

Tenemos la costumbre de asociar los drones con las aeronaves de última tecnología que existen hoy en día. Pero la realidad es que los drones existen desde hace ya casi 200 años. El primer registro sobre los drones fue en Julio de 1849 en el primer bombardeo de la historia en Venecia donde se usaron alrededor de 200 globos aerostáticos no tripulados cargados con bombas.

Figura 6: Bombardero en Venecia



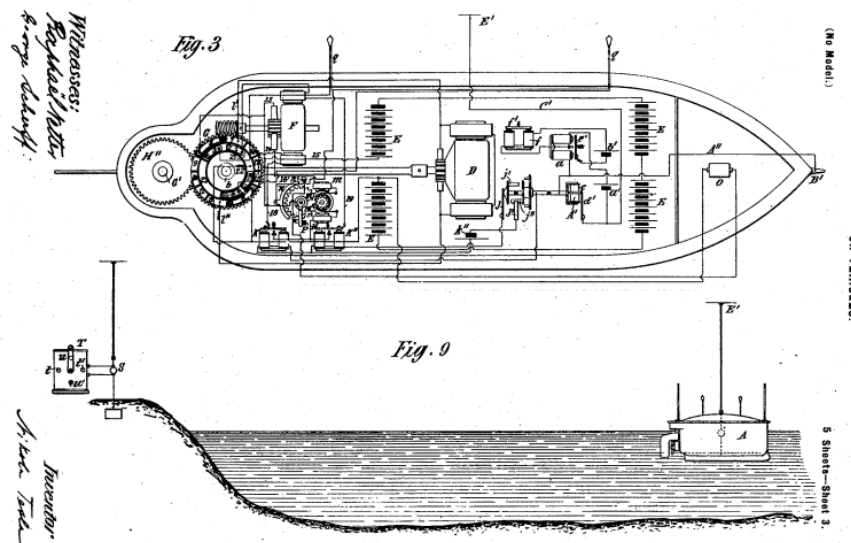
Fuente: www.osbodigital.es

Después de la Guerra Civil en Estados Unidos (1861-1865) se empezaron a volar globos para misiones de reconocimiento. En 1896 Samuel P. Langley desarrolló

aeronaves de vapor sin piloto que se usaron para sobrevolar el río Potomac. La primera fotografía de reconocimiento aéreo se realizó en el 1898 cuando los militares estadounidenses equiparon una cámara a una cometa.

Nikola Tesla creó y patentó el primer radio control de un vehículo en el 1898 considerándose este invento como la cuna de la robótica moderna. Tesla demostró su invento pilotando un barco a distancia con una señal de radio en el Madison Square Garden.

Figura 7: Radio control de Nikola Tesla



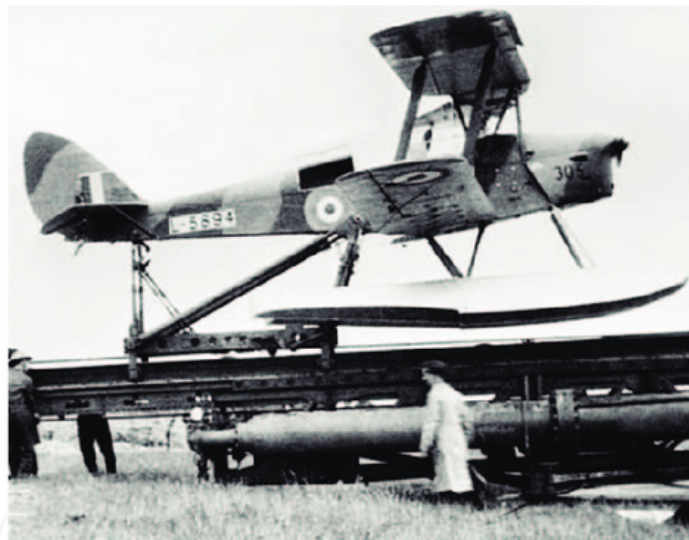
Fuente: Fotografía sacada de la patente de Tesla

En el 1916. El capitán Archibald M. Low creó el primer avión sin piloto el cual recibió el nombre de Ruston Proctor Aerial Target. Esta aeronave estaba basada en la tecnología de Tesla de control remoto y se creó con el objetivo de ser usada como bomba voladora. A pesar de todo, este modelo nunca se utilizó en una batalla real.

Durante la primera guerra mundial, Elmer Ambrose Sperry, inventó una serie de aeronaves sin piloto capaces de lanzar torpedos mediante una catapulta los cuales eran guiados hasta su objetivo para posteriormente volar en vertical para impactar y hacer explotar una carga de TNT capaz de destruir una población entera. El proyecto se canceló al acabar la guerra en el 1918 debido a que existían varios reportes que mencionaban fallos técnicos y numerosos accidentes.

En 1933, en Reino Unido, se desarrolló una nueva aeronave que se controlaba por control remoto desde un barco. A esta aeronave la bautizaron como UAV Queen Bee y posteriormente como DH82A Tiguer Moth. Esta aeronave se usó en la marina británica desde 1934 hasta 1943.

Figura 8: UAV Queen Bee



Fuente: www.research.net

Durante la segunda guerra mundial, se inició un nuevo programa estadounidense de desarrollo de drones llamado Operación Anvil. Estos drones eran guiados por control remoto, pero de forma limitada, las aeronaves tenían que ser pilotadas hasta cierta altura y posteriormente los pilotos tenían que tirarse con paracaídas y ya la aeronave podía ser pilotada de forma remota.

El programa fue un desastre debido a múltiples accidentes. Además, el hermano de John Fitzgerald Kennedy, Joseph, el cual fue uno de los primeros pilotos del programa, murió en 1944 pilotando uno de estos prototipos cuando su aeronave explotó.

Debido a las dificultades de desarrollar una aeronave sin piloto controlada por control remoto, los países empezaron a investigar y desarrollar misiles controlados por control remoto.

Estados Unidos desarrolló el primer torpedo guiado por control remoto, llamado BQ-4/TDR y estaba equipado con una cámara de televisión, la cual permitía al piloto ver las imágenes en un monitor y poder controlar la aeronave a distancia. Este torpedo se utilizó para destruir varios barcos japoneses en el pacífico en el 1944. Por otro lado, se creó el primer modelo de UAV americano, el RP-4, el cual se usaba para entrenar a los tiradores encargados de evitar ataques enemigos con misiles controlados por control remoto.

Figura 9: Torpedo BQ-4/TDR



Fuente: www.designation-systems.net

En paralelo a los estadounidenses, Alemania puso todos sus esfuerzos en la investigación y desarrollo de misiles crucero. Desarrolló el “V1 Vengeance Weapon”, el primer misil crucero equipado con motor de reacción y controlado por control remoto.

Debido a su baja tasa de acierto, se siguió investigando nuevas versiones de este misil. Bon Braun, ingeniero mecánico y aeroespacial alemán, diseñó y desarrolló el cohete V2, versión mejorada del V1. Este misil fue el primero en alcanzar velocidades supersónicas, lo cual lo hacía imposible de desviar por los cazas enemigos.

Figura 10: Cohete V2



Fuente: www.wikipedia.org

Durante la guerra fría, debido a la necesidad de espiar al enemigo, fue el acontecimiento histórico que más impulsó el desarrollo de los drones. Durante esta época, se desarrollaron aeronaves más rápidas y de mayor alcance gracias a la mejora de los sistemas de propulsión a reacción.

La Guerra fría fue un enfrentamiento político, económico, militar y sobre todo ideológico entre Estados Unidos y la Unión Soviética los cuales lucharon por su influencia en Europa, América Latina, Oriente próximo y los estados descolonizados de África y Asia.

El accidente de Francis Gary Powers, piloto estadounidense, durante una misión de espionaje, en la cual fue derribado y capturado por la Unión Soviética, originó un cambio de mentalidad y se creó un programa secreto con el objetivo de desarrollar aeronaves no tripuladas que pudiesen tomar fotografías del territorio enemigo.

La empresa estadounidense Ryan Aeronautics desarrolló el llamado “Ryan Firebee”. Este dron contaba con una cámara que le permitía realizar misiones de reconocimiento. El dron era capaz de volar a grandes alturas y gracias a esto y a su menor tamaño, eran más difíciles de detectar y derribar. Además, podía ser controlado por control remoto desde tierra o desde otra aeronave que viajara cerca suya. Las fotografías realizadas eran reveladas una vez el dron estaba de vuelta a la base.

Figura 11: Ryan Firebee



Fuente: www.es.wikipedia.org

El primer dron con ala rotatoria se creó en el año 1959 y recibió el nombre de Gyrodyne QH-50 DASH. Fue diseñado para ser un arma antisubmarina de largo alcance. Esta aeronave era un pequeño helicóptero de 6,1 metros de longitud y apenas 530 Kg con una potencia de 300 caballos y peso máximo de despegue de 1036 Kg. Se construyeron 758 unidades y las usaron principalmente la Marina de los Estados Unidos y por el ejército japonés.

Figura 12: Gyrodyne QH-50 DASH



Fuente: www.airandspace.si.edu

Durante los años 70 hubo un auge de las misiones de reconocimiento por lo que se desarrollaron varios drones de reconocimiento de largo alcance. Esto fue gracias a la nueva tecnología llamada LORAN (Long Range Navigation) que usaba un sistema de ayuda a la navegación parecido a lo que hoy en día se llama GPS.

3.2.2 Tipos de drones actuales

Hoy en día existen cientos de fabricantes de aeronaves no tripuladas y, por ello, existen muchos tipos de drones. Para poder clasificarlos tenemos que fijarnos en sus características tanto físicas como por su uso, su método de control, etc.

Según su definición:

Como hemos mencionado anteriormente, un dron es una aeronave no tripulada manejada a través de un control remoto, pero esto es únicamente una definición general. Existen diferentes maneras de referirse a este tipo de aeronaves:

- RPA o RPAS: siglas que significan “Remotely Piloted Aircraft” y “Remotely Piloted Aircraft System”. Hace referencia a que la aeronave es controlada por control remoto
- Dron o Drone: Su origen proviene del inglés y significa zángano. Es la forma más popular de llamar a este tipo de aeronaves y se cree que el origen del nombre es militar
- UAV o UAS: siglas que significan “Unmanned Aerial Vehicle” y “Unmanned Aerial System”. Hace referencia a la ausencia de un piloto físico a bordo de la aeronave

Las 3 formas de llamar a estas aeronaves hacen referencia a lo mismo, una aeronave sin piloto a bordo y pilotada a distancia a través de un control remoto.

Según la sustentación o tipo de ala:

Dentro de este criterio existen dos tipos de drones que se diferencian en la forma de sustentarse en el aire, drones de ala fija y drones multirrotor.

- **Drones de ala fija:** Este tipo de aeronaves no son capaces de despegar por sí solos, es decir, necesitan una velocidad inicial que los sustenten en el aire. Estéticamente son los más parecidos a los aviones. Gracias a su forma y aerodinámica, son capaces de volar durante largos periodos de tiempo, haciéndolos ideales para el mapeo de grandes superficies. Su gran inconveniente es que no pueden realizar vuelos estacionarios y como hemos mencionado antes, no pueden despegar de forma autónoma.

Figura 13: Dron de ala fija



Fuente: www.elvuelodeldron.com

- **Drones de ala rotatoria o multirrotores:** Este tipo de aeronaves son las más conocidas y vendidas en el mercado. Se caracterizan por sustentarse en el aire mediante el uso de hélices, las cuales llevan incorporadas en los brazos. Este sistema ofrece grandes ventajas como aportar una gran estabilidad a la aeronave o ser capaces de permanecer quietos sobrevolando en un mismo sitio. Su gran desventaja es la autonomía de vuelo que ofrecen. Dentro de los drones de ala rotatoria, se pueden clasificar en diferentes grupos según el número de brazos o motores con los que cuentan.

Figura 14: Dron de ala rotatoria



Fuente: www.hispadrones.com

Según el número de brazos o motores:

Este tipo de clasificación es la más común y la más fácil de reconocer:

- **Tricóptero o dron de tres hélices:** Como su nombre indica, son aquellos drones compuestos por tres brazos o motores. Los dos delanteros se encargan de dar la potencia y el trasero es el que aporta la estabilidad contando con un servomotor.

- **Cuadricóptero o dron de 4 hélices:** Estos drones cuentan con 4 brazos y 4 motores iguales dos a dos posicionados en forma de cruz para aportar la mayor estabilidad posible. Son el tipo de dron más común y económico que existe en el mercado.
- **Hexacóptero o Dron de seis hélices:** Estos drones cuentan con 6 brazos y 6 motores. Son los más utilizados en el sector profesional ya que son capaces de portar cámaras de gran tamaño junto a un estabilizador para la toma de fotografías y videos aéreos. Otra de sus grandes ventajas es la estabilidad que aportan los 6 brazos y la capacidad de poder aterrizar el dron de forma segura en el caso de perder uno de los motores.
- **Octocóptero o dron de ocho hélices:** Estos drones cuentan con 8 brazos y 8 motores. Cuantos más brazos y motores tengan, más potencia y estabilidad tendrán, pero al mismo tiempo, más pesado y difícil de volar en espacios estrechos. Además, este tipo de drones suelen venir desmontados por lo que el usuario deberá tener los conocimientos de montar, soldar y configurar tanto el dron como el control remoto.
- **Coaxiales:** Este grupo no se caracteriza por el número de brazos que tiene sino por el número de motores que presenta cada brazo. En este caso, los drones coaxiales cuentan con dos motores por brazo. Suelen ser tricópteros o cuadricópteros, aunque también existen de seis brazos o más. Su principal ventaja es que, al contar con el doble de motores, son capaces de levantar grandes pesos.

Según su tipo de motor:

Existen dos tipos de motores que pueden tener los drones:

- Motor de dron brushed: Este tipo de motores son conocidos por tener escobillas y son los más comunes en los drones de ocio.
- Motor de dron brushless: Este tipo de motor es conocido por carecer de escobillas que hagan contacto con el rotor.

Comparativa entre ambos motores:

	Motor brushed	Motor brushless
Precio	Más económico	Más caro
Mantenimiento	Mayor mantenimiento	Mantenimiento mínimo
Velocidad máxima	50-70 Km/h	150-200 km/h
Extras para funcionamiento	No	Necesidad de un Electronic Speed Controler (ESC) para definir la velocidad de giro del motor

Tabla 1 : Comparativa del motor Brushed y Brushless.

Según la nueva normativa 2021:

En la nueva normativa de 2021 los drones se dividen en 7 clases: C0, C1, C2, C3, C4, C5 y C6. El dron irá en una clase u otra en función de sus características de operación, los sistemas que lo compone y el equipo que lo controla de forma remota.

A continuación, se presentan los principales requisitos que debe tener el dron para pertenecer a una clase u otra y las etiquetas correspondientes que deben portar.

Drones de clase C0:

- MTOW (Peso máximo al despegue) inferior a 250 gramos
- Velocidad máxima (máx.) de 19 m/s
- Altura máxima respecto a la altura de despegue de 120 metros
- Eléctrico

Algunos ejemplos de drones de clase C0 son: Mavic Mini, DJI Mini 2 o el Parrot Airbone Night McLane.

Drones de clase C1:

- MTOW menor de 900 gramos o energía de transmisión en caso de accidente menor de 80 Julios
- Velocidad máx. horizontal de 19 m/s
- Altura máxima respecto a la altura de despegue a 120 m
- Eléctrico
- Número de serie único
- Incluir un sistema de geoconsciencia
- Incluir un sistema de aviso de batería baja

Algún ejemplo de dron de esta categoría es el Mavic Air 2 y el Autel EVO.

Drones de clase C2:

- MTOW menor a 4 Kilogramos
- Altura máxima respecto a la altura de despegue de 120 m

- Eléctrico
- Incluir un enlace de datos protegido para las funciones de mando y control
- Incluir un modo de baja velocidad (3 m/s)
- Número de serie único
- Incluir sistema de identificación a distancia directa y a distancia de red
- Incluir un sistema. De geoconsciencia
- Incluir un sistema de aviso de batería baja
- Luces para el vuelo nocturno

Algún ejemplo de esta categoría sería el Autel EVO 2, el Phantom 4 y el Mavic 2 Pro.

Drones de clase C3:

- MTOW menor de 25 kg
- Dimensión menor de 3 metros
- Eléctrico
- Número de serie único
- Sistema identificación a distancia directa y a distancia de red
- Sistema de geoconsciencia
- Incluir un sistema de aviso de baja batería
- Luces de vuelo nocturno

Algún ejemplo de dron de clase C3 es el Inspire 2, el Matrice DJI y el Matrice 600 PRO

Drones de clase C4:

- MTOW menor a 25 Kg
- Carencia de modo de vuelo automático excepto asistencia de estabilización o asistencia en caso de pérdida de enlace
- Estar fabricados con la intención de ser usados en el aeromodelismo

Drones de clase C5:

- MTOW menor a 25 Kg
- Aeronave de ala rotatoria (excepto UA cautiva)
- Incluir sistema que te de información sobre la altura del dron en todo momento
- Incluir sistema de baja velocidad (5 m/s)
- Incluir sistema de seguridad en caso de pérdida de enlace o en caso de fallo
- Incluir un enlace de datos protegido para las funciones de mando y control
- Eléctrico
- Número de serie único
- Incluir un sistema de identificación a distancia directa
- Incluir sistema de geoconsciencia
- Incluir un sistema de aviso de batería baja
- Luces vuelo nocturno
- Los drones de clase C3 podrán ser considerados de clase C5 si llevan instalados un Kit de accesorios que hagan que el dron cumpla con las especificaciones de clase C5 (este Kit no podrá incluir cambios en el software del dron)

Algún ejemplo de dron de clase C5 es el Dron Velutina o el Matrice 600 pro con un sistema de pértiga.

Dron de clase C6:

- MTOW menor a 25 kg
- Incluir sistema de información sobre la altura del dron en todo momento
- Incluir sistema que evite que supere los límites horizontales y verticales de un volumen operacional programable
- Velocidad máxima horizontal de 50 m/s

- Incluir sistema de seguridad en caso de pérdida de enlace o en caso de fallo
- Incluir un enlace de datos protegido para las funciones de mando y control
- Eléctrico Número de serie único
- Incluir un sistema de geoconsciencia
- Incluir un sistema de aviso de batería baja
- Luces de vuelo nocturno

Un ejemplo de dron que se encuentre en esta categoría es el AeroHyb Hexacopter.

Tanto la elección de la clase como el cumplimiento de todas las características de dicha clase recae sobre el fabricante del dron. Aquellos drones que no tienen la etiqueta de clase se denominan legacy drones.

4 Normativa Europea UAS

Categorías de operaciones de UAS (sistema de aeronave no tripulada)

Las operaciones de UAS se dividen en las categorías “abierta”, “específica” o “certificada” según las condiciones de vuelo y las especificaciones técnicas del dron que se va a utilizar.

- **Categoría abierta**

Las operaciones realizadas en esta categoría no requieren ninguna autorización previa ni una declaración operacional por parte del operador del UAS. Los requisitos que se deben cumplir son los siguientes:

- La masa máxima de despegue no supera los 25 Kg;

- La aeronave vuela a una distancia segura de las personas o no vuela sobre concentraciones de personas;
- Durante el vuelo la aeronave se encuentra en todo momento en el alcance visual del piloto a distancia, salvo en vuelo en modo “sígueme” o se use una cámara de aeronave no tripulada;
- La distancia de vuelo vertical máxima es de 120 metros excepto en los casos de que se esté sobrevolando un obstáculo;
- La aeronave no transporta ninguna mercancía peligrosa o alguna mercancía que se pueda caer;
- Si la aeronave vuela a menos de 50 metros (horizontales) de un obstáculo artificial de más de 105 metros de altura, la altura máxima de operación se podrá incrementar hasta 15 metros por encima de la altura del obstáculo;
- Las operaciones dentro de la categoría abierta se pueden dividir a la vez en las subcategorías A1, A2 y A3, dependiendo de las limitaciones operacionales, los requisitos que deben cumplir los pilotos a distancia y los requisitos técnicos que deben cumplir los UAS.

Operaciones de subcategoría A1:

Las operaciones que pertenezcan a esta subcategoría deberán cumplir los siguientes requisitos:

- Las operaciones que se realicen con aeronaves con marca C1 no podrán sobrevolar concentraciones de personas o personas no participantes. En el caso de sobrevolar alguna persona no participante, se intentará minimizar el tiempo de vuelo sobre estas;

- El piloto a distancia deberá estar familiarizado con el manual de usuario del UAS;

- El piloto a distancia deberá llevar a cabo un curso de formación online y aprobar un examen teórico aprobado por la autoridad competente en las materias relacionadas con la seguridad aérea, las restricciones del espacio aéreo, la reglamentación de la aviación, limitaciones del rendimiento humano, procedimientos operacionales, conocimientos sobre los UAS, privacidad y protección de datos.

Operaciones de subcategoría A2:

Las operaciones que pertenezcan a esta subcategoría deberán cumplir los siguientes requisitos:

- No sobrevolar personas no participantes a menos de 30 metros de distancia horizontal. Esta distancia se podrá reducir a 5 metros en los casos de que la aeronave cuente con un modo de baja velocidad y se tengan en cuenta las condiciones meteorológicas, el rendimiento de la aeronave y el aislamiento de la zona;

- El piloto a distancia debe conocer el manual de usuario del UAS y disponer de un certificado de competencia de piloto. Para obtener este certificado será necesario realizar un curso de formación en línea, superar un examen teórico (mencionado en el apartado de operaciones de subcategoría A1), completar una formación de autopráctica y aprobar un examen teórico adicional sobre meteorología, rendimiento de vuelo del UAS y las atenuaciones técnicas y operacionales del riesgo en tierra;

- Si se realiza con una aeronave con marca de clase C2 deberá cumplir los requisitos aplicables a esta clase y contar con sistemas activos de identificación a distancia directa y de geoconsciencia.

Operaciones de subcategoría A3:

Las operaciones que pertenezcan a esta subcategoría deberán cumplir los siguientes requisitos:

- Se llevarán a cabo en zonas donde no se ponga en peligro a ninguna persona no participante;
- Se llevarán a cabo a una distancia mínima de 150 metros de zonas residenciales, comerciales, industriales o recreativas;
- El piloto debe haber completado el curso de formación online y los exámenes teóricos mencionados en la subcategoría A2;
- Se podrá realizar con drones de marca C2, C3 y C4 siempre y cuando cuenten con sistemas activos y actualizados de identificación a distancia directa y de geoconsciencia.

Los operadores y pilotos de UAS también tienen que cumplir unos requisitos dentro de esta categoría.

Responsabilidades del operador de UAS:

En primer lugar, definamos lo que es un operador de UAS, “es toda persona física o jurídica que utilice o tenga intención de utilizar uno o varios UAS, tanto para fines profesionales como recreativos” (Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947).

Las principales responsabilidades de un operador de UAS en la categoría abierta son elaborar procedimientos operacionales en cada tipo de operación y en cada riesgo existente, seleccionar un piloto a distancia para cada operación asegurándose de que conozca el manual de usuario del dron y tenga las competencias adecuadas y la información necesaria para llevar la operación a cabo, actualizar la información del

sistema de geoconsciencia y garantizar que en las operaciones de subcategoría A2 y A3, todos los participantes conozcan los riesgos y hayan aceptado el participar.

Responsabilidades del piloto a distancia de UAS:

Un piloto a distancia en categoría abierta tiene unas responsabilidades antes de iniciar una operación, entre ellas destacan, tener las competencias apropiadas para realizar la operación, obtener información actualizada pertinente para la operación, comprobar la existencia de obstáculos y de personas no participantes, asegurarse de que las condiciones del dron son correctas y en el caso de llevar una carga externa, asegurarse de que esta no supere la carga máxima de su clase. Además, tiene unas responsabilidades durante el vuelo, no desempeñar sus tareas bajo el efecto de alguna sustancia psicoactiva o alcohol, o en condiciones que le afecten a su rendimiento como lesiones, cansancio, medicación, enfermedad u otras causas. Mantendrá un control visual de lo que hay a su alrededor para evitar posibles colisiones, tiene que ser capaz de controlar el dron, seguir las condiciones y limitaciones del manual de usuario y respetar los procedimientos del operador.

- **Categoría específica**

Las operaciones realizadas en esta categoría requieren una autorización operacional previa y una declaración del operador del UAS. Los requisitos que se deben cumplir son los siguientes:

- Cuando no se cumpla uno de los requisitos mencionados previamente en la categoría abierta se debe solicitar una autorización operacional;
- En la solicitud se debe incluir una evaluación del riesgo junto a unas medidas de atenuación;

- Informar a las autoridades competentes de cualquier cambio en la información aportada en la declaración operacional por parte del operador;

Una vez solicitada la autorización operacional, la autoridad competente analizará los riesgos, las medidas de atenuación que propone el operador de UAS, la competencia del personal y las características técnicas del dron. Se concederá la autorización si una vez analizados todos los factores se garantiza la seguridad de la operación.

Igual que en la categoría abierta, los operadores y pilotos de UAS tienen unas responsabilidades. Algunas de estas responsabilidades son:

Responsabilidades del operador de UAS

El operador de UAS en categoría específica tiene las mismas responsabilidades que un operador de categoría abierta, pero incluyendo algunas responsabilidades más. Algunas de estas responsabilidades son, incluir medidas de protección contra interferencias ilegales y de acceso no autorizado, asegurar que en las operaciones se utilice eficazmente el espectro radioeléctrico, encargarse no solo del piloto a distancia sino de todo el personal encargado de las tareas esenciales para la operación y asegurarse de que han completado la formación pertinente, que han sido informados sobre el manual de operaciones del operador y de que han obtenido información actualizada sobre la zona geográfica, llevar un registro de la información sobre las operaciones y mantener el dron en buen estado.

Responsabilidades del piloto a distancia

En este caso las responsabilidades de un piloto a distancia en la categoría específica son las mismas que en categoría abierta

- **Categoría certificada**

Las operaciones realizadas en esta categoría requieren de una certificación del UAS, una certificación del operario y una licencia por parte del piloto a distancia. Esta categoría engloba aquellas operaciones de riesgo alto con drones de dimensiones de 3 metros o más, transporte de personas, transporte de mercancías peligrosas u operaciones que sobrevuelen concentraciones de personas.

Los requisitos que se deben cumplir son los siguientes:

- El UAS está certificado
- La operación se realiza en alguna de estas condiciones:
 - Volar sobre concentraciones de personas;
 - Transporte de personas;
 - Transporte de mercancías peligrosas que puedan provocar un riesgo elevado a terceros en caso de accidente.
- La operación se clasificará en la categoría “certificada” si la autoridad competente considera que la operación requiere de una certificación del UAS y del operador y una licencia por parte del piloto a distancia para atenuar los riesgos de la misma.

4.1 ¿Cómo nos afectaría la normativa?

La inspección de aerogeneradores con drones se encuentra dentro de la categoría específica. Las principales razones son:

- la mayoría de los aerogeneradores existentes en España tienen una altura superior a 120 metros;
- sobrevolar un dron en condiciones desfavorables a una distancia cercana al aerogenerador está considerado como una operación de riesgo medio;
- Para realizar este tipo de inspecciones se van a necesitar drones de clase C5 o C6, los cuales no están dentro de la clase abierta.

Por otro lado, la clase específica se descarta ya que no se requiere del uso de drones de más de 3 metros de dimensiones, no se sobrevuelan concentraciones de personas, ni requiere de transporte de personas o mercancías peligrosas.

La responsabilidad de cumplir con los requisitos de clase C5 o C6 del dron recae sobre el fabricante por lo que no será necesario preocuparse por esto. Pero si debemos tener en cuenta los requisitos de pertenecer a la clase específica. Los requisitos más importantes a tener en cuenta son:

- Realizar una autorización operacional y una declaración operacional por parte del operador del UAS
- Realizar una evaluación de riesgo junto a unas medidas de atenuación
- Tanto el piloto como el operador del UAS deberán tener todos los cursos requeridos dentro de la categoría específica, además de cumplir con todos los

requisitos que previamente hemos mencionado en el apartado de categoría específica de la Normativa Europea de UAS.

En el caso de subcontratar a una empresa que realice la inspección, la empresa dueña del parque eólico deberá exigir el cumplimiento de todos los requisitos de la normativa a la empresa subcontratada.

5 Estado del arte

5.1 Localización parques eólicos

Uno de los principales retos de las compañías eléctricas es decidir en qué zonas instalar los parques eólicos no solo por el rendimiento de éstos sino también por el impacto medioambiental que tienen. Por ello, vamos a analizar qué requisitos tienen que cumplir las zonas donde se quiere instalar un parque eólico.

Los parques eólicos se suelen construir en áreas rurales despobladas y donde no haya un tránsito elevado de aves, especialmente de especies protegidas. Esto es debido a que los aerogeneradores son muy altos y crean cambios en el entorno visual, producen ruidos y tienen la fuerza suficiente como para matar a las aves.

Por otro lado, el viento es el factor más importante a la hora de elegir una zona u otra. Antes de decidir la zona, se realiza un estudio de la dirección, temperatura y capacidad de generación máxima del viento durante un periodo de un año para asegurarse de que el proyecto sea rentable. Es necesario buscar zonas con velocidades de viento superiores a 6 m/s durante al menos 2.200 horas por año. Hoy en día ya existen herramientas y

modelos meteorológicos que ayudan a determinar qué zonas son las más idóneas y estimar cuál será la capacidad de producción del parque durante toda su vida útil.

También hay que tener en cuenta la orografía del terreno. Construir un parque eólico conlleva transportar componentes de gran tamaño y peso como las palas, la torre, el buje, etc. y sería muy complicado acceder a zonas donde el relieve es muy accidentado o a una zona montañosa.

El precio del terreno es otro punto a tener en cuenta. Hay que calcular si el coste del metro cuadrado entra dentro de las posibilidades económicas del proyecto. Un punto positivo en este aspecto es que los terrenos del parque se pueden utilizar para la agricultura y la ganadería y así reducir los costes.

Figura 15: Mapa de la localización de los parques eólicos existentes y futuros en España



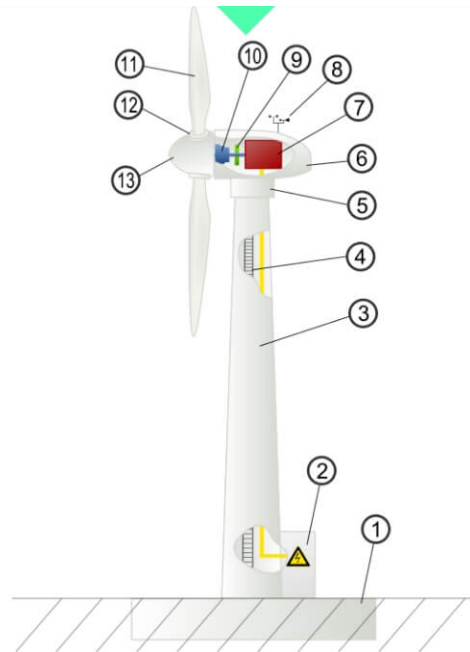
Fuente: www.lagisteria.com

6 Mantenimiento de un parque eólico

Se define como mantenimiento a todas aquellas actividades destinadas a preservar o restaurar una unidad funcional con el objetivo de que esta pueda continuar prestando el servicio para el cual fue diseñada. Dentro de ingeniería y la industrial estas actividades se resumen en comprobaciones, mediciones, reemplazos, ajustes y reparaciones.

6.1 Partes de un aerogenerador

Figura 16: Esquema de un aerogenerador



1. Cimentación	7. Generador eléctrico
2. Conexión a la red eléctrica	8. Anemómetro
3. Torre	9. Freno de disco
4. Escalera de acceso a la góndola	10. Caja multiplicadora
5. Sistema de orientación	11. Palas
6. Góndola	12. Mecanismo de cambio de paso
	13. Buje

1- Cimentación: Es la estructura que aporta la estabilidad y garantiza la integridad del aerogenerador. Para conseguirlo se utilizan más de 200 toneladas de hormigón

2- Conexión red eléctrica

3- Torre: Es la parte estructural del aerogenerador. Su finalidad es la de aguantar todo el peso de las palas, rotor y góndola. Cada vez se hace más alta y suele estar fabricada de acero

4- Escalera acceso góndola

5- Sistema de orientación: Su función es la de orientar la góndola en el sentido opuesto al viento. Está constituido por un conjunto de motores que junto a la veleta y el anemómetro son capaces de orientar la góndola con el ángulo exacto.

6- Góndola: Estructura en la que en su interior se encuentran los componentes más importantes del aerogenerador

7- Generador eléctrico: Se encarga de transformar la energía mecánica de rotación del eje en energía eléctrica

8- Anemómetro: Mide la velocidad y el sentido del viento con la finalidad de orientar la góndola en la dirección correcta. Esto ayuda a que se maximice el rendimiento del aerogenerador y no sufra cargas peligrosas.

9- Freno de disco: Frena las palas en caso de que sea necesario hacerlo (fuertes vientos, avería, etc.)

10- Caja multiplicadora: Eleva las revoluciones por minuto de las palas (giros) a un valor óptimo para la generación eléctrica en el generador. Las revoluciones óptimas de forma habitual son 1500 rpm obteniendo una frecuencia de 50 Hz.

11- Palas: Estructura del aerogenerador cuya finalidad es la de oponer resistencia al viento y así conseguir energía cinética.

12- Mecanismo de cambio de paso: Se encarga de orientar las palas de forma que genera más o menos resistencia al viento.

13- Buje: Une las palas a la góndola y al eje que transmite el giro a la caja multiplicadora

6.2 Principales averías en un aerogenerador

Las averías de los aerogeneradores se dividen en dos grandes grupos, por un lado, pequeño correctivo, que se caracterizan por ser averías que producen pequeñas pérdidas en cuanto a la producción y que normalmente se reparan en menos de 24 horas. Este tipo de averías suelen ser las paradas debidas a fallos en la lectura de los instrumentos de medida que provocan que el aerogenerador se pare, fallos eléctricos, fugas de aceite, reparaciones de frenos o fallo en alguno de los motores eléctricos. Por otro lado, aquellas averías que causan grandes pérdidas de producción y requieren un gran tiempo de reparación se clasifican como gran correctivo.

Averías más frecuentes – Pequeño correctivo:

- Seguridades de rearme local: vibraciones, torsión de algún cable, fallo en la multiplicadora, calentamiento en el convertidor
- Averías en los instrumentos de medición: sensores de vibración, termostatos, anemómetro, veleta, etc.
- Fallos electrónicos: tarjetas UPS, controladoras, etc.
- Averías en el sistema hidráulico: filtros, válvulas, bombas, etc.
- Elementos mecánicos
- Reparaciones de picados, pintura, bordes de ataque y de refuerzo de palas

Averías más frecuentes – Gran correctivo:

- Averías en los rodamientos y defectos de aislamiento en los generadores

- Problemas en los rodamientos y piñones de la multiplicadora
- Perforaciones y desconchados en las palas
- Avería en el moto-reductores de orientación
- Avería en los acoplamientos eje rápido

Averías menos frecuentes – Gran correctivo:

- Avería en el sistema de Pitch
- Averías en el convertidor
- Rotura de dientes y coronas en el sistema del Yaw
- Avería en los rodamientos de las palas
- Fisuras y grietas en el bastidor

Nota: Existen otros fallos o averías a parte de las previamente mencionadas

6.3 Tipos de mantenimiento de un aerogenerador

El mantenimiento se puede dividir en:

- **Mantenimiento correctivo:** denominado como “mantenimiento reactivo” se lleva a cabo cuando existe un fallo o avería en el equipo. Debido a que el mantenimiento se realiza una vez encontrado el fallo o avería, no depende de los planes de mantenimiento (no es un mantenimiento planeado previamente por el usuario). Existen dos tipos de mantenimiento correctivo:

- **Mantenimiento correctivo no planificado:** se realiza cuando existe un fallo prematuro de las piezas o por falta de supervisión del rendimiento del equipo, teniendo que realizar una reparación de emergencia.

- **Mantenimiento correctivo planificado:** se realiza cuando se produce una bajada del rendimiento de un equipo sin llegar a existir un fallo o avería. Por tanto, la reparación puede ser programada y no se considera de emergencia.

Principales ventajas de este tipo de mantenimiento:

- Bajos costes a corto plazo debido a que se trata de una actividad reactiva y no hay que llevar a cabo ninguna planificación antes o después del mantenimiento.
- Planificación mínima: como hemos mencionado antes, al tratarse de una actividad reactiva (se realiza cuando se identifica el fallo o avería) no es necesario una planificación compleja.
- Es la mejor opción en aquellos casos donde el coste de mantenimiento preventivo sea superior a los costes de parada y reparación del equipo.

Principales desventajas de este tipo de mantenimiento:

- Paradas imprevistas, limitando las horas operativas del equipo
- Costes por reparación y repuestos no previstos, por lo tanto, no presupuestados. Esto puede ocasionar una falta de recursos debido a la falta de tiempo y de financiación
- El tiempo que el equipo está fuera de operación no se puede predecir

- Costes mayores a largo plazo

- **Mantenimiento Preventivo o planificado:** se lleva a cabo antes de que exista un fallo o avería con el objetivo de evitar averías más costosas y de prolongar la vida útil del equipo. Como su nombre indica, es necesario realizar una planificación que especifique el momento en el que se va a realizar este mantenimiento en base a la experiencia y pericia del personal o por indicaciones del fabricante a través de los manuales técnicos y el procedimiento o actividades necesarias con el objetivo de tener los recursos necesarios.

Existen 4 tipos de mantenimiento preventivo:

- **Mantenimiento preventivo programado:** se caracteriza por realizarse en intervalos de tiempo predefinidos o siguiendo un criterio sin tener en cuenta las condiciones de uso de la máquina. Este tipo de mantenimiento solo se realiza en aquellos equipos o piezas en las que se conoce a la perfección su curva de vida o degradación y su coste de cambio no es elevado. Algún ejemplo sería el cambio de aceite, resistencias o bombillas, el ajuste de tensión de correas, presión, etc.

- **Mantenimiento preventivo de oportunidad:** se realiza en aquellos periodos en los que el equipo no está en funcionamiento con el objetivo de minimizar las paradas de producción y maximizar las horas operativas.

- **Mantenimiento preventivo basado en la condición:** este mantenimiento se basa en los parámetros del equipo o máquina como indicador de que se va a producir un fallo o avería. Ejemplos de estos parámetros serían la presión, el nivel, el flujo, etc. La ventaja con respecto al mantenimiento programado es que no se requiere de conocimientos

adicionales, sino la comparación de los valores actuales de la máquina con los umbrales predefinidos. Estas medidas se pueden realizar de forma continua (Mantenimiento condicional continuo) o de forma periódica (Mantenimiento condicional discontinuo).

- **Mantenimiento predictivo:** vamos a analizar este tipo de mantenimiento más adelante en profundidad por lo que nos lo saltamos por ahora.

Principales ventajas de este tipo de mantenimiento:

- Se puede realizar en cualquier momento. Esto permite que, por ejemplo, en el caso de los parques eólicos, se realice en las horas donde no se genere electricidad.
- Reduce el número de paradas, aumentando las horas operativas del equipo
- Reduce el presupuesto de mantenimiento
- Disminuye las probabilidades de que se produzcan averías graves
- Permite a la empresa tener un historial del equipo

- **Mantenimiento Predictivo:** tiene como objetivo detectar un fallo o avería antes de que se produzca permitiendo reducir los tiempos de parada y facilitando la planificación de la reparación sin afectar a la producción (por ejemplo, en días sin viento). Una de las grandes desventajas de este mantenimiento es su alto coste debido a las complejas pruebas o ensayos que se tienen que llevar a cabo (Análisis de vibraciones, fotos termográficas, análisis de ruidos, etc.) En la actualidad, en la mayoría de los parques eólicos no se lleva a cabo este tipo de mantenimiento debido

a que los altos costes no cubren los riesgos que se evitan. No obstante, esto está cambiando gracias a que cada vez estas pruebas o ensayos son más fiables y conllevan un menor coste.

El mantenimiento predictivo cuenta con tres componentes principales:

- Sensores y dispositivos que permiten el seguimiento del estado y rendimiento de la máquina en tiempo real
- Uso de softwares que junto al data mining (minería de datos) y la aplicación de big data permite analizar una enorme cantidad de datos
- Uso de machine learning utilizando los datos procesados para establecer patrones y comparaciones, elaborar predicciones de fallos y realizar un plan de mantenimiento.

Las principales ventajas que nos aporta este mantenimiento son:

- Reduce la probabilidad de fallos y averías
- Reduce el número de intervenciones o mantenimientos
- Reduce el tiempo de parada durante el mantenimiento
- Aumenta la vida útil de la máquina
- Aumenta las horas de operación de la máquina
- Reducción de accidentes y aumento de seguridad

Entre las desventajas encontramos:

- Es necesaria una mayor cualificación para el análisis de datos
- Alto coste
- Alineación en la empresa para realizar la gestión y análisis

6.4 Niveles de mantenimiento correctivo y preventivo

Dentro del mantenimiento correctivo y preventivo existen 5 niveles que se definen en función de su impacto en el propio aerogenerador. Para clasificar el daño dentro de un nivel es importante anotar su localización, el impacto que tiene sobre la turbina y el tiempo que requiere repararlo. Los niveles son:

Nivel 1: En el mantenimiento de primer nivel se realizan intervenciones sencillas que no requieren desmontar o abrir el equipo y es realizado por un operario no especializado. No es necesario realizar un plan de acción

Nivel 2: En el mantenimiento de segundo nivel se realizan intervenciones poco complejas. En este caso, si se lleva a cabo una apertura del equipo, pero no en su totalidad. Este tipo de mantenimiento lo ejecuta un técnico de cualificación media. No es necesario realizar un plan de acción si no es necesario, solo se realiza el mantenimiento si fuera necesario o si hay que reparar otros daños mayores.

Nivel 3: En el mantenimiento de nivel tres se realizan intervenciones complejas que requieren de un diagnóstico y una identificación previa. Este tipo de mantenimiento lo ejecuta un técnico especializado con herramientas especiales que se suelen indicar en las instrucciones de mantenimiento de la máquina. Es necesario realizar un plan de acción con un límite de 6 meses

Nivel 4: En el mantenimiento de nivel cuatro se realizan operaciones complejas e importantes en las que se requieren conocimientos técnicos específicos. Este tipo de mantenimiento lo realiza un técnico especializado o en el caso de ser un equipo, será necesario que esté presente un responsable especializado. Es necesario realizar un plan de acción con un límite de 3 meses y hay que monitorizar el daño.

Nivel 5: En el mantenimiento de nivel 5 se realizan operaciones en el mismo nivel que las de fabricación. Este tipo de mantenimiento lo realiza el propio fabricante del equipo o por una empresa aprobada por el fabricante. Es necesario realizar el mantenimiento de forma inmediata para evitar daños más importantes y un posible accidente y es necesario parar el equipo por causas de seguridad.

Figura 17: Niveles de mantenimiento y su correspondiente acción

CATEGORÍA	DAÑO	ACCIÓN	TURBINA
	1  Cosmético Lectura del sistema eléctrico por debajo de 50mΩ	 No requiere de una acción inmediata	 Continuar Operación
	2  Daños por debajo del desgaste	 Reparar sólo si hay otros daños que reparar	 Continuar Operación
	3  Daños por encima del desgaste Lectura del sistema eléctrico por encima de 50mΩ	 Reparar antes de 6 meses	 Continuar Operación
	4  Daño grave	 Reparar antes de 3 meses Monitorizar daños	 Continuar Operación
	5  Daño crítico	 Requiere acción inmediata para prevenir daños mayores. Contactar con soporte técnico	 Parar Operación No se puede asegurar la seguridad de la estructura

A continuación, se presenta una tabla con algunos ejemplos de operaciones que se realizan en cada nivel y en cada tipo de mantenimiento:

	Mantenimiento correctivo	Mantenimiento preventivo
Nivel 1	- Reemplazo de bombillas, sensores	-Lubricación -Comprobación estado de los filtros, luz indicadora, etc.
Nivel 2	-Reemplazo de piezas de recambio (cadenas, fusibles, etc.)	-Reemplazo de un filtro de difícil acceso -Comprobación parámetros de los instrumentos -alineación de motores
Nivel 3	-Diagnóstico -Reparación de una fuga de aceite o en un equipo de refrigeración -Cambio de piezas de recambio estándares (motor, engranajes, cojinetes, etc.)	-Controles y reglajes, incluyendo instrumentos de medición
Nivel 4	-Reemplazo de una cabeza de cable en baja tensión -Reemplazo de válvulas	-Análisis de vibración -Análisis de aceites -Termografía infrarroja
Nivel 5	-Reconstrucción de equipos -Adecuación de un equipo a la nueva normativa	

Tabla 2 : Ejemplos de operaciones de cada nivel y tipo de mantenimiento.

6.5 ¿Cuándo se realiza cada tipo de mantenimiento?

El mantenimiento predictivo se realiza desde el principio permitiendo predecir los fallos y averías antes de que sean visibles. Posteriormente en base al análisis predictivo, se realiza el mantenimiento preventivo con el objetivo de alargar la vida útil de la máquina y, por último, se realiza el mantenimiento correctivo cuando se producen fallos o averías en la máquina.

Figura 18: Gráfica tiempo-condición de un aerogenerador



Por otro lado, como podemos observar en la gráfica, inicialmente el riesgo de fallo producido por la avería es bajo estando el aerogenerador en plenas condiciones de funcionamiento. Si se realiza un análisis predictivo se podría anticipar una avería mayor antes de que se produzca.

Si no hacemos nada, empiezan a aparecer más síntomas de una avería (vibraciones y ruidos casi imperceptibles y pequeños cambios térmicos). Este es el momento en el que aparece el mantenimiento preventivo, con cual evitaríamos que estos pequeños fallos se

convirtieran en una avería grave. En este punto el riesgo del aerogenerador sigue siendo bajo y su condición de funcionamiento seguiría siendo alto, pero en peores condiciones.

De nuevo, si no hiciéramos nada, aparecerían ruidos audibles, cambios de temperatura altos, piezas sueltas, grietas de gran tamaño, etc. En este punto el riesgo de fallo es alto e incluso crítico. Además, la condición de trabajo del aerogenerador es muy bajo incluso nulo en aquellos casos que sea necesario la parada del aerogenerador. El coste de reparación en este punto es muy alto ya que generalmente la avería que inicialmente era pequeña se ha expandido a otros puntos del aerogenerador afectando a otras piezas.

6.6 Técnicas de inspección exterior existentes hoy en día en parques eólicos:

- Inspecciones desde el suelo mediante equipo telescópicos

Este tipo de mantenimiento se realiza desde el suelo mediante el uso de cámaras de gran resolución para obtener fotos de las distintas partes del aerogenerador. Posteriormente, gracias a un software informático, las imágenes son analizadas y se realiza un plan de actuación. Este software no está siempre incluido en el servicio de la empresa contratada por lo que generalmente hay que pagar más por ello o que la empresa de aerogeneradores tenga su propio software.

El riesgo de este método de inspección es bajo y es el más económico de los tres. Este trabajo puede ser realizado por un solo técnico y no requiere de costes adicionales (ej. seguros).

Uno de los puntos negativos de esta técnica es que muchas veces hay sombras en el aerogenerador por lo que dificulta la toma de fotografías de alta calidad. Además, desde

el suelo, es imposible tomar fotos de todos los ángulos y rincones del aerogenerador por lo que este método no es siempre eficaz.

Por último, es necesario tener una gran capacidad de almacenamiento debido a la gran cantidad de fotografías de alta calidad y, por lo tanto, imágenes de gran tamaño.

Figura 19: Inspección en tierra



Fuente: www.applus.com

- Inspecciones exhaustivas de la superficie de la pala con plataforma, plataforma suspendida o mediante escalada-rappel

Esta técnica consiste en que un técnico suba a la cima del aerogenerador y mediante un sistema de cuerdas inspeccione cada rincón del aerogenerador con sus propios ojos y manos.

Figura 20: Inspección en altura



Fuente: www.espanol.cgtn.com

A la hora de encontrar daños, esta es posiblemente la técnica más efectiva, ya que, gracias a la experiencia del técnico, este es capaz de reconocer cualquier daño que exista en la estructura y su alcance.

Otro punto positivo es que si existen daños dentro de las categorías 1-3 el técnico es capaz de arreglarlos al mismo tiempo que inspecciona el aerogenerador. Los daños encontrados tienen que ser documentados mediante imágenes.

Alguno de los puntos negativos es que este método en específico requiere de unas condiciones meteorológicas específicas. Si la velocidad del viento supera los 10 m/s no se recomienda trabajar a esas alturas y, por lo tanto, la inspección y las reparaciones no se pueden llevar a cabo.

Otro punto negativo es el riesgo que conlleva este tipo de inspección. Los técnicos se tienen que elevar generalmente a más de 120 metros de altura, considerándose un trabajo de alto riesgo.

El número de aerogeneradores que se puede inspeccionar con este método es limitado, se suele inspeccionar entre 1 y 2 turbinas al día debido a la gran cantidad de tiempo que requiere inspeccionar cada aerogenerador (hasta 6 horas por aerogenerador).

Por último, destacar el alto coste que conlleva realizar este tipo de inspección. Requiere de un equipo de mínimo 3 personas especializadas y contratar seguros especiales debido al alto riesgo los cuales tienen un coste elevado.

	Coste	Eficiencia	Seguridad	Tiempo
Inspección en tierra	Requiere de una sola persona para realizar este trabajo y no se precisa de costes adicionales	Al no tener acceso a todas las partes del aerogenerador, la calidad de los datos es pobre y poco precisa.	Riesgo muy bajo. Es una técnica segura	Hasta 5 horas por aerogenerador debido a los cambios de luz y entre 1 o 2 turbinas al día
Inspección en altura	Requiere de al menos 3 personas para realizar este trabajo y se precisa de contratación de seguros de alto coste debido al alto riesgo.	Gracias a la cercanía a los daños y la experiencia y conocimientos del técnico, los resultados son óptimos.	Las condiciones de trabajo a alturas tan altas se consideran de alto riesgo.	Hasta 6 horas por aerogenerador y entre 1 o 2 aerogeneradores al día

Tabla 3 Resumen inspección en tierra y en altura.

6.7 Principales factores de riesgo en el mantenimiento de un aerogenerador

El mantenimiento de los aerogeneradores o turbinas conlleva ciertos riesgos que hay que tener en cuenta. En este apartado se pretende analizar aquellos riesgos más importantes y que mayor frecuencia tienen. Un aerogenerador está formado por equipos de trabajo e instalaciones eléctricas que se encuentran a grandes alturas y que por su configuración obliga al técnico a trabajar en espacios reducidos y de difícil acceso. Según los datos aportados por las empresas del sector, los accidentes más graves, pero a su vez menos frecuentes son los producidos por la energía eléctrica, caídas de altura, caída de objetos o equipos, atrapamientos, golpes y cortes con elementos móviles. Por otro lado, los más leves y frecuentes se ocasionan por sobreesfuerzos, posturas forzadas y accidentes durante los desplazamientos por los parques eólicos. A continuación, se presenta una tabla con los posibles accidentes que se pueden ocasionar en función de la zona de trabajo de los aerogeneradores.

Góndola, Buje y Palas.

En esta zona de trabajo es donde se realizan la mayoría de las tareas de mantenimiento. Se sitúa a unos 25-100 metros de altura y se considera la zona de mayor riesgo. El riesgo más importante en la góndola es el de caída por altura la cual se puede producir en las aberturas de la puerta o escotilla, luego otros riesgos altos son el de atrapamiento y corte con los equipos de trabajo (eje lento, multiplicadora, acoplamiento, pinzas de freno y generador), accidentes producidos por electricidad con los armarios eléctricos o el generador y explosiones debidas a la presencia de gases a presión en el sistema hidráulico.

Por otro lado, el buje es una zona cerrada con acceso a través de una escotilla de pequeña dimensión situada en la góndola. Desde el buje, a través de una tapa, se puede

acceder al interior de las palas, las cuales son de dimensiones más reducidas y con una mayor dificultad de rescate en caso de un accidente. Los riesgos más importantes en el buje y las palas son las posiciones forzosas en los espacios de acceso al buje y en el interior de las palas, atrapamiento en el eje principal del aerogenerador y deficiencia de oxígeno en la atmósfera provocado por la hermeticidad del espacio o debido a gases presentes como el N₂ que emiten los acumuladores y los disolventes de limpieza.

Cabe destacar que en estas zonas la evacuación es difícil y lenta en caso de producirse una emergencia.

Equipo: Generador, eje, multiplicadora y grupo hidráulico

Instalación eléctrica: Armarios eléctricos, generadores, conductores y transformador.

Zonas peligrosas: Exterior de la góndola, puerta evacuación, puerta elevación cargas, palas y buje.

Riesgos	Factores de Riesgo
Contacto eléctrico	Generador. Armarios eléctricos. Conductores.
Caída de altura	Huecos. Puerta de evacuación. Exterior de la góndola. Fisuras. Anclaje incorrecto. EPI inadecuados. Superar peso. Máximo autorizado
Caída de objetos	Herramientas. Equipos.
Explosión	Fluido hidráulico. Gas a presión. Arco eléctrico.
Desplome	Aerogenerador. Palas. Elevador. Grúa. Fibra.

Atrapamiento	Eje. Multiplicadora. Pinzas de freno. Generador. Palas. Rotor. Sistema regulación paso variable. Puerta acceso. Caída tensión de red.
Asfixia	Deficiencia de oxígeno en la góndola.
Exposición temperaturas extremas	Calor y frío
Golpes/Cortes	Polipasto y puente grúa. Estructura. Herramientas y equipos. Equipos móviles

Tabla 4 : Factores de riesgo en la góndola, buje y palas.

Base y Torre

Parte del aerogenerador donde se conecta con la subestación eléctrica y el ascenso a la góndola. A la torre se accede a través de una escotilla y una vez dentro, a través de un ascensor o mediante escaleras, se tiene acceso a las diferentes plataformas de trabajo.

En la base los riesgos más importantes son los ocasionados por accidentes eléctricos en el mantenimiento del armario de baja tensión y en las celdas de alta tensión. En cuanto a la torre, los riesgos a destacar son los de caída de altura a la hora de subir por la torre, el sobreesfuerzo que esto conlleva, caídas de objetos, y accidentes derivados de la electricidad.

Equipo: Elevador de servicio o escaleras

Instalación eléctrica: Conductores, armario eléctrico, celdas maniobra alta tensión, transformador.

Zonas peligrosas: Foso, hueco elevador, plataformas intermedias (corona y transformador).

Riesgos	Factores de Riesgo
Atrapamiento	Trampilla. Elevador. Puerta acceso. Sistema orientación. Pinzas de freno y yaw. Trampilla foso
Desplome	Plataforma. Elevador. Aerogenerador.
Explosión	Arco eléctrico. Armarios baja tensión. Componentes eléctricos
Exposición con agentes químicos	SF6 en celdas de maniobra. Grasas. Aceites. Fluido hidráulico. Productos de limpieza. Fuga de SF6 de celdas de maniobra de alta tensión.
Caída altura	Huecos torre. Escaleras
Sobresfuerzos	Manipulación cargas. Ascenso por escalera.
Contacto eléctrico	Armarios eléctricos a baja tensión. Celdas de maniobra alta tensión
Incendio	Materiales no ignífugos. Focos eléctricos. Focos mecánicos.
Golpes/Cortes	Estructura metálica. Herramientas. Equipos. Escaleras.

Tabla 5 : Factores de riesgo en la base y torre.

Medidas de prevención:

- Analizar las condiciones meteorológicas previas al mantenimiento
- Mantenimiento preventivo para asegurar el estado de los equipos de trabajo y de las instalaciones eléctricas
- Parar el aerogenerador y asegurarse de que no queda ninguna energía residual
- EPI adecuado y revisión y mantenimiento del mismo según la normativa en vigor
- Formación de los técnicos
- Medidas de actuación en casos de emergencia

Estrés Térmico

El cuerpo humano genera calor continuamente el cual, en condiciones normales, se transfiere al medio con el objetivo de mantener la temperatura interna. El estrés térmico ocurre cuando existe una dificultad de transferir ese calor al medio y por ello, la temperatura interna del cuerpo aumenta. Los factores más comunes que producen un estrés térmico son el trabajo físico, condiciones ambientales de alta temperatura y/o alta humedad y llevar una vestimenta que no permita evacuar el calor al medio. Durante el mantenimiento de un aerogenerador están presentes los tres factores de riesgo previamente mencionados.

El mantenimiento de un aerogenerador se caracteriza por tener unas exigencias físicas muy altas. Algunas de estas exigencias es la subida de las escaleras, el traslado de equipos de trabajo, las posturas forzadas, trabajos que se realizan en cuclillas o con los brazos levantados y el apriete mecánico de ciertas piezas a mano. Además, existen unas exigencias psicológicas muy altas. Los técnicos deben coordinarse entre sí perfectamente, tienen una alta responsabilidad, deben seguir unos protocolos muy específicos, deben

realizar su trabajo con un gran nivel de atención, precisión y rapidez, y todo ello sabiendo que hay una gran probabilidad de accidente.

Por otro lado, el trabajo realizado por los técnicos requiere el uso de ropa con protección aislante y equipamiento de protección individual. Este equipamiento suele contener un arnés, un sistema de anticaídas, línea de vida de cuerda, eslinga de doble anclaje, eslinga regulable de 2 metros con absorbedor de energía, casco, ropa ignífuga y aislante, gafas, guantes, botas de seguridad, rodilleras, linternas, gafas y equipos de protección respiratoria.

Todas estas condiciones favorecen la aparición de estrés térmico y esto puede ser peligroso para el técnico. Por un lado, la exigencia física y psicológica produce que la temperatura de nuestro cuerpo aumente y por el otro, el equipamiento requerido dificulta la evacuación del calor interno al medio.

Inicialmente el estrés térmico provoca malestar, fatiga, debilidad, mareos, dolor de cabeza y alteraciones de comportamiento y de atención, síntomas que aumentan la probabilidad de cometer un fallo y por lo consiguiente aumenta la probabilidad de que se produzca un accidente. Si la temperatura interna del cuerpo sigue aumentando y no se trata, se ocasiona lo que coloquialmente se conoce como golpe de calor. El golpe de calor aparece cuando la temperatura interna sube de los 40 grados y produce un fallo multiorgánico afectando al cerebro, el corazón, los riñones y los músculos. Si no se trata, puede conducir al coma y posteriormente a la muerte.

7 Propuesta mejora mantenimiento de un parque eólico mediante el uso de drones y cámaras termográficas

Como hemos mencionado previamente los drones nacieron para usarse exclusivamente en usos militares, pero hoy en día, gracias a su desarrollo tecnológico su uso se ha expandido a otros campos profesionales.

Nuestro objetivo es analizar si con la tecnología existente, se podría llevar a cabo las inspecciones exteriores del aerogenerador con drones.

Antes de ponernos a analizar las aplicaciones de los drones en la inspección de un parque eólico es importante ver aquellos sectores en los que los drones ya se están usando y tienen una aplicación en ellos.

7.1 Aplicaciones actuales de un dron

Cinematografía y Televisión:

Hoy en día se usan los drones para la captura profesional de audio y video en las producciones de cine y televisión. Además, permiten la retransmisión de deportes y grandes espectáculos como la Formula 1. Otro de los avances tecnológicos en este campo es mediante el uso de unas gafas especiales, los espectadores son capaces de ver conciertos y otros espectáculos en 3D y en tiempo real.

2. Mapeo y Vigilancia:

En la actualidad los drones son capaces de portar cámaras especiales con reconocimiento facial lo que permite reconocer y alarmar sobre la intrusión de alguna persona a larga distancia. Por otro lado, la policía está haciendo uso de los drones en misiones como el control de fronteras, vigilancia de tráfico, control medioambiental, etc.

3. Búsqueda y rescate:

Gracias a la mejora de las baterías y la capacidad de almacenamiento de información los drones son capaces de cubrir grandes distancias. Esto permite que se puedan utilizar y sean efectivos en la búsqueda de personas. Además, con las nuevas cámaras termográficas que permiten localizar puntos calientes como personas, hace que el uso del dron sea cada vez mayor.

4. Aplicaciones dentro de la industria:

4.1 Agricultura de precisión:

Las principales aplicaciones de los drones en la agricultura son:

- **Conteo de plantas:** permite calcular el número de plantas en un recinto y N controlar la velocidad de crecimiento
- **Medición de clorofila:** con la ayuda de una cámara NDVI se puede supervisar el nivel nutricional de las plantas
- **Zonas de estrés hídrico:** con las cámaras térmicas se pueden detectar las zonas que por sus características necesitan una mayor o menor cantidad de agua

- **Estado sanitario:** se pueden detectar si la plantación ha sido afectada por alguna enfermedad y si es necesaria la aplicación de algún fertilizante

- **Malas hierbas:** permite una detección rápida de estas plantas, evitando así que se apropien de los nutrientes destinados a la plantación.

- **Detección de plagas:** con el control aéreo se pueden localizar aquellas zonas donde el crecimiento de las plantas es menor o tienen un aspecto decaído, indicios que presentan una posible plaga.

4.2 Inspección de infraestructuras y construcciones:

Uno de los principales problemas a la hora de inspeccionar infraestructuras y construcciones es el difícil acceso a alguna de las zonas de estos. Esta es una de las grandes ventajas de los drones, que nos permiten acceder a cualquier sitio de una forma rápida, segura y económica. Además, con la ayuda de cámaras HD, térmicas y multiespectrales nos permiten detectar averías, fugas, zonas con un mal aislamiento, etc

4.3 Inspección de líneas eléctricas

Con el uso de diferentes cámaras como las termográficas o las ultravioleta podemos detectar puntos calientes, efecto corona en líneas de alta tensión, observar si hay vegetación u objetos demasiado cercanos a nuestra línea, etc. Así mismo, se pueden realizar todas estas supervisiones sin interrumpir el suministro eléctrico

7.2 Aplicación de los drones en la inspección de un parque eólico

Ya hemos estudiado las técnicas de inspección de aerogeneradores desde el suelo y en altura y hemos visto sus ventajas y desventajas. La propuesta de este trabajo es la de realizar este tipo de inspección con drones. Hace unos años, esta alternativa podría sonar como una locura o como algo imposible, pero gracias al desarrollo de estas aeronaves, se están empezando a usar en actividades industriales ofreciendo aplicaciones que serían imposibles de conseguir de otra manera.

La mayoría de los fallos importantes que se producen en un aerogenerador provienen de pequeñas grietas en la superficie que a partir de un punto de concentración de tensiones o por un defecto del material se van haciendo cada vez más grandes. El problema es que estas pequeñas fisuras generalmente no son visibles a simple vista y por eso la mayoría de los fallos por fatiga aparecen sin aviso.

Con las cámaras correctas, los drones son capaces de detectar estas grietas además de erosiones, corrosiones, hongos, fugas de aceite y otros defectos en la superficie de un aerogenerador de una forma segura y rápida.

Las principales ventajas del uso de drones son:

- Gracias a maniobrabilidad y tamaño de los drones, estos son capaces de inspeccionar todos los rincones del aerogenerador;
- Reducción de la peligrosidad laboral evitando que los trabajadores tengan que subir ellos mismos al aerogenerador para posteriormente colgarse de ellos;

- Ahorro de costes. A diferencia de la inspección en altura, que son necesarios como mínimo 3 técnicos, sólo se necesita un piloto cualificado para realizar la inspección. Así mismo, tal y como hemos comentado, la reducción de la peligrosidad laboral evita tener que contratar seguros de alto coste;
- Permite realizar un programa de mantenimiento previo a la subida al aerogenerador. Con la inspección en altura, los técnicos suben al aerogenerador sin saber qué daños se van a encontrar por lo que posiblemente no dispongan de las herramientas necesarias en caso de encontrarse una avería importante. Esto significa que para poder reparar los daños tendrán que bajar a por el material necesario y posteriormente volver a subir a realizar la reparación. Con el uso de los drones evitamos la primera subida y permite realizar un plan de acción abaratando los costes y aumentando la productividad;
- Reducción del tiempo de inspección. La inspección en altura y desde el suelo se tarda entre 6-7 horas por aerogenerador y como mucho se pueden inspeccionar dos aerogeneradores al día. Los drones son capaces de realizar esta inspección en 20-45 minutos por aerogenerador dependiendo del tamaño del aerogenerador y las condiciones meteorológicas;
- La posibilidad de poder instalar diferentes cámaras al dron permite encontrar daños que no son visibles a simple vista;
- Mejora del servicio debido al incremento de la fiabilidad de los equipos.

Principales desventajas:

- Necesidad de tener una gran capacidad de almacenamiento debido a la gran cantidad de fotografías de alta calidad y, por lo tanto, de gran tamaño;

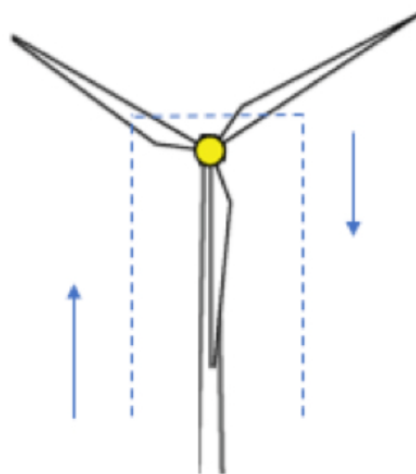
- Necesidad de un software que almacene y ordene las fotografías. Las fotografías tienen que estar documentadas especificando de qué zona del aerogenerador se trata ya que posteriormente mirando la fotografía sería imposible identificarlo. Este es el mayor reto que existe hoy en día a la hora de realizar este tipo de inspección.

7.3 ¿Cómo se hacen estas inspecciones con drones?

Existen tres técnicas de inspección de palas con drones, las tres con ventajas y desventajas, pero todas totalmente válidas. Estas técnicas son:

- **Posicionamiento de las palas a las 6 horas:** las palas se colocan una a una manualmente mirando hacia abajo (6 horas de un reloj). El dron recorre los cuatro lados de la pala posicionando la cámara en un paso de 0 grados orientada verticalmente hacia la superficie.

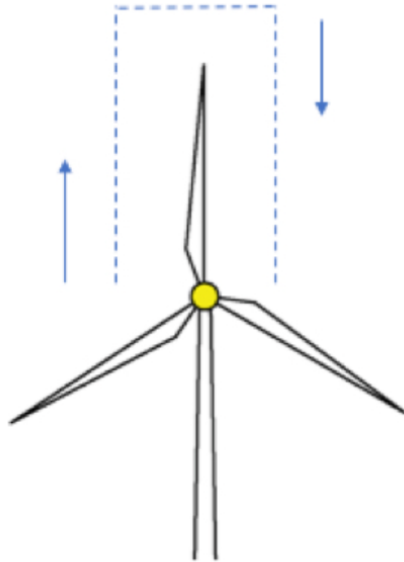
Figura 21: Representación aerogenerador con pala mirando hacia las 6 en punto



Representación aerogenerador con la pala
mirando hacia las 6 en punto

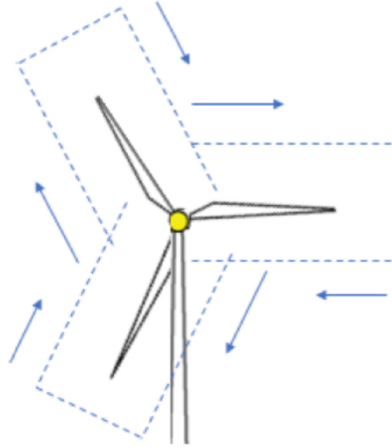
- **Posicionamiento de las palas a las 12 horas:** las palas se colocan una a una manualmente mirando hacia arriba (12 horas del reloj). El dron recorre los 4 lados de la pala posicionando la cámara en un paso de 0 grados orientada verticalmente hacia la superficie.

Figura 22: Representación aerogenerador con pala mirando hacia las 12 en punto



- **Posicionamiento ángulo fijo:** Se detiene el aerogenerador en una posición específica a gusto del inspector. El dron recorre los cuatro lados de las tres palas sin la necesidad de ir posicionando pala a pala hacia abajo o hacia arriba.

Figura 23: Representación aerogenerador con un posicionamiento con ángulo fijo



Técnica de inspección	Posición 12 Horas	Posición 6 Horas	Posición Fija
Ventajas	- Facilidad de la toma de imágenes del borde de fuga - Fácil de volar sin maniobras complicadas - Vuelo manual o automatizado - Ausencia de obstáculos	- El dron vuela a la mínima altitud posible - Más rápido que el de 12 H - Mejor visibilidad del dron - Vuelo manual o automatizado - Fácil de volar sin maniobras complicadas	- El método más rápido ya que no es necesario mover las palas - El más eficiente debido a que generalmente solo es necesario un juego de baterías - Ideal cuando no hay viento
Desventajas	- Mayor tiempo de inspección debido a la necesidad de posicionar cada pala verticalmente - En esta posición el dron tiene que volar hasta el punto más alto del aerogenerador - mala visibilidad del dron debido a la gran altura	- Mayor tiempo de inspección debido a la necesidad de posicionar cada pala hacia abajo - La torre actúa como obstáculo haciendo que la inspección del borde de salida solo pueda hacerse desde un ángulo diagonal	- Requiere de un modo de vuelo automatizado ya que hacerlo de forma manual puede ser complicado - La inspección debe planificarse con mucho detalle para evitar colisiones con los obstáculos - El paso del cardán debe ajustarse en la vertical de la pala.

Tabla 6 : Ventajas y desventajas de las 3 técnicas de inspección de aerogeneradores con drones.

7.4 Qué características técnicas necesitaría un dron para realizar la inspección de un aerogenerador

Para conocer qué características técnicas necesitaría un dron para realizar este tipo de inspecciones, tenemos que conocer qué accesorios, qué modos de vuelo y qué sistemas de seguridad necesita el dron.

En primer lugar, el dron debe ser capaz de volar hasta alturas mayores de 125 metros ya que si queremos inspeccionar un aerogenerador usando la técnica de las 12 en punto es necesario que cumpla este requisito. Además, cada vez los aerogeneradores son más altos y ya existen aerogeneradores cuyas torres superan esta altura.

El dron debe ser capaz de transportar una cámara de alta resolución o una cámara térmica sin perder potencia y estabilidad para conseguir unos resultados óptimos.

Las inspecciones de aerogeneradores con drones suelen tardar entre 25-45 minutos por lo que debe tener una batería capaz de aguantar por lo menos este tiempo en plenas condiciones.

En el caso de que se quisiera realizar la técnica de inspección de posición fija, el dron deberá disponer de un modo de vuelo autónomo.

Además, por cuestiones de calidad, el dron deberá tener un sistema de estabilización que le permita permanecer estable en condiciones climatológicas adversas

Por último, por cuestiones de seguridad y por normativa, para realizar vuelos a distancias cercanas, el dron deberá tener un sistema de seguridad ante colisiones que detecte si se va a colisionar y rectifique el vuelo en dicho caso.

Por dar un ejemplo de un dron que cumpla estos requisitos, sería:

Matrice 300 RTK:



Figura 24: Dron Matrice 300 RTK - DJI

Este dron es un modelo de la empresa DJI, una de las empresas líderes en el sector de los drones. Algunas de sus características son:

- Tiempo máximo de vuelo: 50 minutos
- Altitud máxima de vuelo: 7000 metros
- Resistencia máxima al viento: 12 m/s
- Estabilizador de vuelo tanto en la parte superior del dron como en la parte inferior
- Modo de vuelo autónomo
- Operacional en temperaturas de -20 a 50 °C
- Baliza anticollisiones
- Capacidad de instalar más de una cámara a la vez, ideal para nuestras inspecciones ya que necesitamos usar cámaras termográficas

Nota: Este es un simple ejemplo de dron que cumple con nuestros requisitos, no hemos realizado un estudio de los drones existentes en el mercado y elegido el mejor modelo.

7.5 Cámaras termográficas

Una cámara termográfica es un dispositivo que realiza imágenes térmicas de objetos gracias a que es capaz de medir las emisiones de radiación infrarroja de estos sin la necesidad de estar en contacto con ellos. La emisión de radiación infrarroja está directamente relacionada con la temperatura del objeto, siendo generalmente mayor la emisión cuanto mayor temperatura tenga el objeto.

Este tipo de cámaras son capaces de medir miles de píxeles/puntos de manera independiente siendo cada píxel de la imagen una medición de la temperatura del objeto al cual se le asigna un color. De forma universal, las cámaras térmicas muestran las temperaturas más bajas de un color azul, violeta o verde y las temperaturas más altas de un color rojo, amarillo o naranja.

Además, vienen incorporadas con algoritmos avanzados que permiten obtener un grado de precisión de hasta ± 0.3 °C haciendo uso de un cuerpo negro que se mantiene a una temperatura constante haciendo de referencia para la cámara.

Este tipo de cámaras se utilizan en varios sectores como el sanitario, energía renovable, aeropuertos, veterinaria, construcción y en la industria.

7.5.1 Tipos de cámaras termográficas

Las cámaras termográficas se pueden clasificar según la tecnología con las que están fabricadas (refrigeradas o no refrigeradas) y en función de su modo de operación (activas o pasivas).

Según su tecnología

- **Cámaras termográficas refrigeradas:** este tipo de cámaras termográficas cuentan con un sensor colocado en una unidad cerrada al vacío conectada a un refrigerador lo que le permite trabajar con temperaturas muy bajas. Esta tecnología consigue que haya un contraste muy grande entre la temperatura del sensor y la temperatura ambiente, consiguiendo unos niveles de sensibilidad muy altos. Estos equipos tienen un coste muy alto de fabricación, de mantenimiento y un gran consumo de energía. Se usan principalmente en el sector militar, policía y en procesos de fabricación muy especializados en la industria automotriz.

Figura 25: Cámara termográfica refrigerada



Fuente: www.insatecsl.com

- **Cámaras termográficas no refrigeradas:** este tipo de cámaras usan un sensor microbolómetro, el cual, no necesita enfriamiento. Su sensibilidad es alta en cortas distancias, pero no tienen la misma sensibilidad que las cámaras refrigeradas en largas distancias. Se suelen fabricar con óxido de vanadio y con silicio amorfo. Estas cámaras son las más usadas en el sector industrial y para la medición de la temperatura corporal.

Figura 26: Cámara termográfica no refrigerada



Fuente: www.flir.es

Según su modo de operación

- **Cámaras termográficas pasivas:** este tipo de cámaras no necesitan agregar ningún elemento adicional para captar la radiación. Es decir, son capaces de captar la radiación que emite cuerpo. Son las más usadas por los profesionales.
- **Cámaras termográficas activas:** este tipo de cámaras utilizan un reflector cuya función es iluminar e irradiar el cuerpo que se quiere captar y junto a un sensor, se genera la imagen térmica. El reflector puede estar integrado o no en la propia cámara térmica. El nivel de sensibilidad de estas cámaras es mayor.

7.5.2 Aplicaciones actuales de la cámara termográfica

Hoy en día las cámaras termográficas se usan en casi todos los sectores que nos podamos imaginar ya que son muy útiles y no especialmente caras. Algunas de los sectores en los que se usan son:

1. Electrónica:

Las cámaras termográficas sirven para medir la distribución de la temperatura en los componentes electrónicos y así poder encontrar cortos o averías en los mismos.

2. Medicina y veterinaria:

Las cámaras térmicas tienen varias aplicaciones dentro de la medicina y la veterinaria, como, por ejemplo, realizar análisis médicos no invasivos, detectar lesiones gracias al incremento del riego sanguíneo, localizar animales invasores o nidos en una población,

detectar cambios de temperaturas en los cuerpos de seres humanos o animales siendo síntomas de cólicos, infecciones, inflamaciones o cargas musculares, etc.

3. Instalaciones solares:

Las placas solares para que funcionen y cumplan su función tienen que estar en perfecto estado. Gracias a las cámaras térmicas son capaces de localizar cualquier defecto que halla en ellas e incluso desperfectos ocultos que no son visibles por el ojo humano.

4. Construcción:

Hoy en día las viviendas se inspeccionan con cámaras térmicas con el objetivo de localizar zonas donde exista una pérdida de energía provocada por una falta de aislamiento, detectar zonas con humedades, analizar circuitos eléctricos, detectar averías en conductos de aire o calefacción, etc.

Otro sectores o aplicaciones en los que intervienen las cámaras térmicas son: control de fiebre en una epidemia, vigilancia de animales salvajes, inspección del estado de árboles, seguridad fronteriza, producción de acero, búsqueda de vertidos de petróleo, detección de amenazas nucleares o radiológicas, etc.

7.5.3 Aplicación de la cámara termográfica en el mantenimiento de un parque eólico

El mantenimiento preventivo se vuelve cada vez más importante cuanto más viejo es el aerogenerador ya que las probabilidades de avería se vuelven mucho mayores. Con el mantenimiento preventivo evitamos averías mayores y, por lo tanto, evitamos costosos fallos y tiempos de inactividad. En España, en la actualidad, más de 14.500 MW de los 28.000 MW que se generan mediante aerogeneradores, tienen una antigüedad de 15 y 20 años. Este valor representa más del 50% de los aerogeneradores existentes y teniendo en cuenta que la edad media de un aerogenerador está entre los 25 y 30 años de vida útil, más de la mitad de los aerogeneradores se encuentran en sus últimos años de antigüedad.

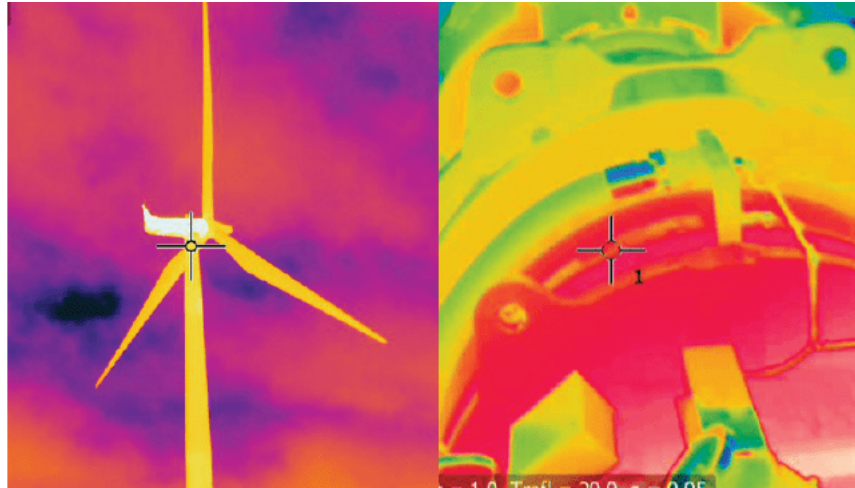
La termografía es la única tecnología que permite inspeccionar todos los componentes mecánicos y eléctricos de los aerogeneradores como de los sistemas eléctricos circundantes. Alguna de las averías que la termografía puede detectar son:

- Roturas
- Defectos debidos a rayos
- Puntas dañadas
- Problemas de fibra
- Fallos de uniones adhesivas
- Errores de paso de pala
- Desalineación de ejes
- Pérdidas de aislamiento en la góndola
- Fricción en los elementos móviles

Algunos de estos fallos no son visibles a simple vista porque no se encuentran en el exterior y gracias a la cámara termográfica podemos detectar estos fallos en una etapa

temprana antes de que provoquen una avería mayor y así reducir los costes y posibles accidentes más graves.

Figura 27: Fotografía realizada con una cámara térmica



Fuente: www.apliter.com

8 Comparativa de las tres técnicas de inspección

Una vez vistas las tres técnicas posibles de inspección exterior del aerogenerador, es conveniente realizar una comparativa de las tres para poder ver sus principales ventajas y desventajas de cada una de ellas.

	Coste	Eficiencia	Seguridad	Tiempo
Inspección en tierra	Requiere de una sola persona para realizar este trabajo y no se precisa de costes adicionales	Al no tener acceso a todas las partes del aerogenerador, la calidad de los datos es pobre y poco precisa.	Riesgo muy bajo. Es una técnica segura	Hasta 5 horas por aerogenerador debido a los cambios de luz y entre 1 o 2 turbinas al día
Inspección en altura	Requiere de al menos 3 personas para realizar este trabajo y se precisa de contratación de seguros de alto coste debido al alto riesgo.	Gracias a la cercanía a los daños y la experiencia y conocimientos del técnico, los resultados son óptimos.	Las condiciones de trabajo a alturas tan altas se consideran de alto riesgo.	Hasta 6 horas por aerogenerador y entre 1 o 2 aerogeneradores al día
Inspección con drones	Requiere de solo una persona, el piloto, para realizar este trabajo. Suele ser el más barato de los tres métodos, aunque no cambia mucho respecto a la inspección en tierra	La gran accesibilidad del dron permite la toma de fotografías de gran calidad y por lo tanto es un método muy eficaz.	Riesgo bajo. Es una técnica segura es condiciones climáticas buenas	Entre 20 a 45 minutos por aerogenerador dependiendo del tamaño del mismo.

Tabla 7 : Resumen inspección en tierra, en altura y con drones.

Analizando brevemente la tabla, se ha definido como variables importantes el coste, la eficiencia, la seguridad y el tiempo de inspección de cada técnica.

En cuanto al coste, a priori, las técnicas más baratas son la inspección en tierra y la inspección con drones ya que solo requieren de una persona y no necesitan la contratación de seguros de alto coste. Más adelante se realizará un análisis económico más exhaustivo y así poder ver mejor las diferencias de coste entre las tres técnicas.

Referente a la eficiencia, la inspección en altura y la inspección con drones son las que mejores resultados obtienen. La peor es la inspección en tierra debido a la lejanía al aerogenerador y la dificultad de la toma de fotografías de buena calidad.

La técnica más segura es la inspección en tierra ya que solo requiere acceder al parque y tomar fotografías desde el suelo. La segunda más segura es la inspección con drones, ya que la persona que se encarga de realizar esta inspección también permanece en tierra, pero el sobrevolar un dron cerca un aerogenerador hace que el riesgo sea mayor. La más peligrosa por razones obvias es la inspección en altura.

Por último, y posiblemente lo más importante a tener en cuenta es el tiempo de inspección. Para realizar cualquiera de las tres inspecciones hace falta parar el aerogenerador y esto conlleva pérdida de ganancias.

Existe una gran diferencia entre el tiempo de inspección con drones y las otras dos técnicas. Los drones son capaces de inspeccionar un aerogenerador en 20-45 minutos según el tipo del mismo siendo la técnica más rápida entre las tres. Las otras dos técnicas tardan entre 4-6 horas por aerogenerador y solo permite la inspección de uno o dos aerogeneradores al día.

Poniendo como ejemplo un parque eólico con 50 aerogeneradores, se tardaría prácticamente un mes en inspeccionar todo el parque mediante la inspección en altura o en tierra, mientras que con los drones si ponemos de media unos 40 minutos de inspección

por aerogenerador y únicamente 6 horas de trabajo al día, se podrían inspeccionar 9 aerogeneradores al día y por lo tanto sería posible inspeccionar el parque entero en menos de una semana.

9 Análisis económico de las tres técnicas de inspección

El factor más importante para una empresa es el dinero, su objetivo es el de obtener los máximos beneficios posibles satisfaciendo las necesidades de sus clientes y cumpliendo con todas las normativas que se le exigen. Por ello, este apartado es posiblemente uno de los más importantes del trabajo.

La idea inicial era la de realizar un análisis del mercado, haciendo una comparativa de los precios de diferentes empresas y de las diferentes técnicas. Contactamos con varias empresas mediante varios emails y llamadas y no obtuvimos respuesta por parte de ninguna de ellas. Esto demuestra la gran opacidad que existe en el sector de las energías renovables debido a la gran competencia entre las empresas.

Por ello los precios representados en las tablas se han determinado estimando las horas de trabajo, el coste de mano de obra por hora, los costes del dron, los costes de los fungibles y de las herramientas de trabajo además de los gastos de manutención y desplazamiento.

Tabla precios inspección desde suelo en euros.

Los modelos de pala elegidos son los más comunes dentro del sector eólico español.

N.º de aerogeneradores del parque	Modelo Pala	Campaña de inspección total	Campaña de inspección parcial	Inspección Puntual
Galicia-Asturias				
60	LM 14.4	158	158	743
30	LM 19.5	164	170	804
25	Fiberblade G23PR	164	169	779
72	LM 21	165	169	911
56	Fiberblade G25P	170	170	949
13	LM 29	171	201	871
21	G-56	165	188	878
4	V-44	234	315	949
Aragón-Soria-Cataluña				
38	LM21	189	217	1442
40	Rotorline RT32	189	205	1334
49	Fiberblade G29P	203	201	1420
8	NR-65.5	245	400	1345
9	G-64.5	239	411	1378
14	V-67 m	212	320	1434
4	V-67 m	336	519	1337
Castilla la Mancha-Valencia				
15	LM 42.5	211	326	1467
21	Vestas	189	260	1356
Catilla y León				

33	LM 37.3 P2	184	199	1128
25	LM 42.5 P	194	210	1129

Tabla 8 : Precios en euros de la inspección en tierra.

Tabla precios inspección en altura en euros

N.º de aerogeneradores del parque	Modelo Pala	Campaña de inspección total	Campaña de inspección parcial	Inspección Puntual
Galicia-Asturias				
60	LM 14.4	711	711	2040
30	LM 19.5	735	735	2285
25	Fiberblade G23PR	723	723	2080
72	LM 21	793	793	2740
56	Fiberblade G25P	753	753	2703
13	LM 29	767	767	2280
21	G-56	1341	1341	4353
4	V-44	1597	1597	4709
Aragón-Soria-Cataluña				
38	LM21	950	950	4291
40	Rotorline RT32	904	904	3974
49	Fiberblade G29P	954	954	4016
8	NR-65.5	1647	1647	7021
9	G-64.5	1640	1640	7485
14	V-67 m	1735	1735	7105
4	V-67 m	2137	2137	6870
Castilla la Mancha-Valencia				
15	LM 42.5	1823	1823	8076
21	Vestas	1586	1586	6066
Catilla y León				

33	LM 37.3 P2	1542	1542	6285
25	LM 42.5 P	1483	1483	5826

Tabla 9 : Precios en euros de la inspección en altura.

Tabla precios inspección con drones en euros

N.º de aerogeneradores del parque	Modelo Pala	Campaña de inspección total	Campaña de inspección parcial	Inspección Puntual	Inspección sin realización de informe
Galicia-Asturias					
60	LM 14.4	196	196	903	134
30	LM 19.5	202	208	964	140
25	Fiberblade G23PR	203	207	939	141
72	LM 21	207	203	1071	145
56	Fiberblade G25P	208	208	1109	146
13	LM 29	210	239	1031	148
21	G-56	203	227	1038	141
4	V-44	272	353	1109	210
Aragón-Soria-Cataluña					
38	LM21	235	256	1602	173
40	Rotorline RT32	227	243	1494	165
49	Fiberblade G29P	222	239	1580	160
8	NR-65.5	283	438	1505	221
9	G-64.5	277	449	1538	215
14	V-67 m	250	358	1594	188
4	V-67 m	374	557	1497	312
Castilla la Mancha-Valencia					
15	LM 42.5	249	365	1627	187
21	Vestas	227	298	1516	165

Catilla y León					
33	LM 37.3 P2	222	237	1288	160
25	LM 42.5 P	232	248	1289	170

Tabla 10 : Precio en euros de la inspección con drones.

Podemos observar tres tablas una por cada técnica de inspección en las cuales se representan los precios de inspección del exterior de un aerogenerador según el modelo de éste y si se hace la inspección de forma individual, parcial o del parque eólico por completo. El objetivo de estas inspecciones es revisar el estado de la torre, la góndola y las palas para posteriormente realizar un plan de actuación y realizar el mantenimiento de la forma más eficiente y rápida posible.

Los precios dependen de varias variables, del tipo de aerogenerador, de la localización del parque eólico, del número de aerogeneradores que hay en el parque o de la técnica que se realice.

En primer lugar, los datos demuestran que hay una diferencia de precio según el tipo de pala que se quiere analizar, esto se debe a que existen palas de diferentes longitudes. Cuanto mayor es la longitud de la pala, mayor tiempo de revisión y, por lo tanto, mayor es el coste.

Otra diferencia de precios se encuentra al analizar las diferentes localizaciones, siendo los precios más caros en Castilla la Mancha-Valencia junto a Aragón-Soria-Cataluña y los más baratos en Galicia y Asturias.

El número de aerogeneradores que hay en el parque eólico es otra de las variables que afectan al precio. Esto es debido a la economía de escala, cuantos más aerogeneradores haya que inspeccionar, menor es el precio que hay que pagar por cada inspección.

Debido a que existen muchas variables que hacen que el precio suba o baje, para poder hacer una comparación más sencilla, calculamos el precio medio de inspección en campaña total, parcial y puntual de cada técnica. Con esto conseguimos tener una imagen más amplia del coste de inspección dependiendo únicamente de la técnica que se escoja y de si se realiza una inspección total, parcial o puntual del parque eólico.

Técnica de inspección	Campaña de inspección total	Campaña de inspección parcial	Inspección Puntual
Tierra	182	253	1139
Altura	1033	1253	4748
Drones	219	291	1299

Tabla 11 : Precios medios en euros de cada técnica de inspección

El precio de la campaña de inspección total se ha obtenido mediante una media ponderada:

$$\text{Precio} = \frac{\sum(\text{Precio de cada modelo} * \text{Nº de aerogeneradores de ese modelo})}{\text{Nº de aerogeneradores totales}}$$

Usando esta fórmula tenemos en cuenta la diferencia de precio que hay por la economía de escala y así obtener un precio más cercano a la realidad.

Para la campaña de inspección parcial no podemos tener en cuenta esta diferencia ya que no nos especifican el porcentaje de aerogeneradores que se inspeccionan en una campaña de inspección parcial. Si nos dieran ese porcentaje podríamos usar la fórmula de arriba.

Por lo tanto, para calcular los precios de campaña de inspección parcial y puntual se ha realizado una simple media aritmética.

Los datos obtenidos muestran que la técnica más barata en cualquiera de las campañas es el de inspección en tierra, resultado esperado debido a que solo requiere de un técnico

y no necesita prácticamente recursos ni es necesario contratar ningún seguro para realizar esta inspección.

En segundo lugar, están los drones, esto es debido a que como hemos visto en la normativa de drones, para realizar vuelos de drones en parques eólicos es necesario contratar seguros. Además, dentro del precio está incluido el coste de analizar las fotos y realizar un informe.

Como era de esperar, el coste de realizar la inspección en altura es el más alto. Como hemos explicado en capítulos anteriores, este tipo de inspección requiere de varias horas, de varios técnicos y de la contratación de seguros de vida costosos.

Por último, hay que destacar que el precio no es el mismo si se realiza una inspección total, parcial o puntual. Esto se debe a que el coste de transportar a un equipo de técnicos hasta la localización del parque eólico para inspeccionar un solo aerogenerador es el mismo que para inspeccionar todos los aerogeneradores o algunos de ellos. Por lo tanto, sale más rentable el transportar al equipo técnico cuando halla que inspeccionar todos los aerogeneradores (inspección total) o cuando halla que inspeccionar una mayoría de ellos (inspección parcial).

10 Conclusiones

El sector eólico ha sido uno de los sectores con mayor crecimiento en los últimos años en Europa con una inversión anual en el 2021 de más de 41.000 millones de euros. Hoy en día, la eólica española es la quinta potencia mundial con mayor potencia instalada y la segunda a nivel europeo, representando un 23% de la producción total de energía en España con un valor de 27.446 MW repartidos en 1.298 parques eólicos y con 21.574 aerogeneradores instalados.

Por otro lado, no cabe duda de que el mantenimiento juega un papel crucial en la rentabilidad de la industria eólica, siendo uno de los mayores retos de hoy en día en el sector eólico español ya que más de 14.500 MW de los 28.000 MW que se generan mediante aerogeneradores, tienen una antigüedad de 15 y 20 años. Este valor representa más del 50% de los aerogeneradores existentes y teniendo en cuenta que la edad media de un aerogenerador está entre los 25 y 30 años de vida útil, más de la mitad de los aerogeneradores se encuentran en sus últimos años de antigüedad.

Por ello para seguir creciendo en la industria, y conseguir un mantenimiento más eficiente y rápido es importante considerar y aplicar nuevos métodos de trabajo y nuevas tecnologías disponibles.

Con el objetivo de garantizar la protección del medio y de la seguridad del personal que se encarga de la inspección y mantenimiento de los aerogeneradores, la nueva alternativa de los drones es idónea ya que es una alternativa cero contaminante, siendo los drones completamente eléctricos y evita la necesidad de subir a los aerogeneradores sin conocer el estado de la estructura que soporta el propio aerogenerador y, por lo tanto, la estructura que mantiene a los trabajadores seguros.

Además, comparando las consecuencias de un posible accidente, el uso de drones supone un riesgo muy pequeño. Teniendo en cuenta que los parques eólicos se suelen encontrar en zonas alejadas de la población, las únicas consecuencias que podría conllevar son la pérdida del dron producido por un choque o por una pérdida de control y un pequeño daño en el propio aerogenerador en el caso de colisión, ambas consecuencias materiales. En cambio, un accidente que tenga un técnico puede tener consecuencias pequeñas como un corte o la rotura de un hueso o consecuencias mayores como la muerte en casos más extremos.

Así mismo, el uso de drones en la inspección de parques eólicos no es solo seguro, sino como hemos visto en apartados anteriores, esta nueva alternativa es más eficaz, reduciendo los tiempos de inspección, más barata, obtiene resultados con la misma calidad que la inspección en altura y permite realizar un plan de mantenimiento antes de subir al aerogenerador. Esto nos ayuda a reducir el tiempo de detección de averías y nos posibilita realizar una mejor evaluación y mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones, reduciendo los costes considerablemente.

La nueva alternativa de drones no solo beneficia a la empresa eléctrica, sino que abre un nuevo mundo laboral, creando nuevos puestos de trabajo. Los técnicos ya existentes siguen siendo necesarios ya que los drones no arreglan los aerogeneradores, sino que los inspeccionan y se necesitarían nuevos técnicos capaces de pilotar los drones.

En capítulos anteriores no hemos hablado mucho de parques eólicos offshore, pero en estas instalaciones se busca un diseño que sea lo más autónomo posible debido a los altos costes y la complejidad de las operaciones de mantenimiento en alta mar. Esto se podría conseguir con el uso de drones, ya que existen drones capaces de realizar vuelos autónomos sin la necesidad de un piloto y sin la necesidad de transportar a un equipo entero en barco.

Además, los drones no solo servirían como herramienta de inspección, sino que se podría usar como equipo de ayuda de salvamento en caso de haber un accidente. Por ejemplo, en un parque eólico offshore, si un hombre cae al agua, podrían usarse para la búsqueda y rescate del mismo.

Por último, incidir en la capacidad de instalar diferentes cámaras y dispositivos en los drones como, por ejemplo, cámaras termográficas, permitiéndonos realizar inspecciones a un nivel más alto y conseguir detectar averías que de otra forma no seríamos capaces de detectar.

Para concluir y resumiendo, la nueva alternativa de drones nos permite realizar las inspecciones de una forma más eficaz, rápida, barata y segura manteniendo la misma calidad que la inspección en altura.

11 Bibliografía

- Álvarez, R. P. (2015). *Evaluación de riesgos de un parque eólico*. Obtenido de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/18034/PereiraAlvarez_Ruben_FM_2015.pdf?sequence=14
- ACGDrone. (s.f.). *Agricultura de precisión con drones*. Obtenido de <https://acgdrone.com/agricultura-de-precision-con-drones/>
- Actitud Ecológica. (s.f.). *Aerogeneradores*. Obtenido de <https://actitudecologica.com/energias-renovables/eolica/aerogeneradores/>
- Adeva, R. (11 de Febrero de 2021). *Todos los tipos de drones según el uso, diseño o control*. Obtenido de ADSLZone: <https://www.adslzone.net/reportajes/drones/tipos-drones/>
- Aero Camaras. (3 de Diciembre de 2019). *Las inspecciones técnicas de aerogeneradores con drones crecen a pasos agigantados*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2021, de <https://cursodedrones.es/inspecciones-tecnicas-de-aerogeneradores-con-drones/>
- Aero Camaras. (2 de Octubre de 2020). *Tipos de drones según la nueva normativa europea de EASA 2021*. Obtenido de <https://aerocamaras.es/clases-de-drones-segun-la-nueva-normativa-europea/>
- Aero Camaras. (5 de Mayo de 2021). *Uso de drones en la policía y guardia civil*. Obtenido de <https://cursodedrones.es/uso-drones-policia-guardia-civil/>
- Aero Camaras. (s.f.). *Control de infraestructuras con drones*. Obtenido de <https://aerocamaras.es/servicios-drones-profesionales/drones-infraestructuras/>
- Aner. (28 de Septiembre de 2020). *¿Qué es el mantenimiento correctivo?* Obtenido de <https://www.aner.com/blog/mantenimiento-correctivo.html>
- Asociación Empresarial Eólica. (1 de Septiembre de 2021). *AEE*. Obtenido de <https://aeeolica.org/wp-content/uploads/2021/10/Informe-Siniestralidad-AEE-2021.pdf>
- Comisión Europea. (2019, 12 de Marzo). *Reglamento delegado (UE) 2019/945 sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas*. Diario Oficial de la Unión Europea.

- Conejo, A. S. (17 de Febrero de 2022). Crece la demanda de pilotos de drones especializados en parquetería, inspecciones de infraestructuras y cultivos. *Elconfidencial*. Obtenido de <https://www.elconfidencialdigital.com/articulo/dinero/crece-demanda-pilotos-drones-especializados-paqueteria-inspecciones-infraestructuras-cultivos/20220216172200350545.html>
- Decide. (28 de Septiembre de 2018). *Las ventajas de implementar mantenimiento predictivo en tu empresa*. Obtenido de <https://decidesoluciones.es/las-ventajas-de-implementar-mantenimiento-predictivo-en-tu-empresa/>
- Delgado, V. (2016). *Historia de los drones*. Obtenido de eldrone: <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>
- DJI. (16 de Septiembre de 2021). *Drones para la inspección de aerogeneradores y la detección de daños en la superficie*. Obtenido de <https://djiarsmadrid.com/es/blog/dji-news/drones-para-la-inspeccion-de-aerogeneradores-y-la-deteccion-de-danos-en-la-superficie>
- DJI. (17 de Marzo de 2021). *Las inspecciones de aerogeneradores con drones mejoran la eficiencia y la fiabilidad de los parques eólicos griegos*. Obtenido de <https://djiarsmadrid.com/es/blog/dji-news/las-inspecciones-de-aerogeneradores-con-drones-mejoran-la-eficiencia-y-la-fiabilidad-de-los-parques-eolicos-griegos>
- Escuela de post grado industrial. (17 de Marzo de 2022). *Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo*. Obtenido de <https://postgradoindustrial.com/mantenimiento-predictivo-caracteristicas-ventajas/>
- Estruga, N. (10 de Diciembre de 2020). *Diseño de un proyecto de parque eólico: Principales factores*. Obtenido de EALDE business school: <https://www.ealde.es/proyecto-parque-eolico/>
- Fang, M. (10 de Octubre de 2019). *HikVision*. Obtenido de <https://www.hikvision.com/es/newsroom/blog/Como-el-mantenimiento-en-remoto-de-los-parques-eolicos-puede-mejorar-la-seguridad-y-la-eficiencia/>
- Flir Teledyne. (12 de Marzo de 2020). *Imágenes térmicas para mantenimiento preventivo en turbinas eólicas*. Recuperado el 25 de Octubre de 2021, de

- <https://www.flir.es/discover/instruments/utilities/thermal-imaging-for-preventative-maintenance-on-wind-turbines/>
- Galaz, A. (15 de Enero de 2020). *Todas las patentes públicas de Nikola Tesla*. Obtenido de Cerebro Digital: <https://cerebrodigital.net/todas-las-patentes-de-nikola-tesla/>
- Garrido, S. G. (s.f.). *Averías habituales en Aerogeneradores*. Obtenido de Renovetec: <http://energia.renovetec.com/124-aver%C3%ADas-habituales-en-aerogeneradores>
- Grupo control Seguridad. (s.f.). *Tipos de cámaras termográficas*. Obtenido de <https://www.grupocontrol.com/tipos-de-camaras-termograficas/>
- Hidalgo, E. (2018). Drones de SkySpecs reducen en 85% tiempo en inspección de aerogeneradores. *Energía16*.
- Historia, e. e. (s.f.). *Neoenergía.com*. Obtenido de <https://www.neoenergia.com/es-es/sala-de-comunicacion/noticias/PublishingImages/Historia-de-la-energia-eolica.pdf>
- Iberdrola. (s.f.). *Apostamos por el uso de drones para la inspección de parques eólicos*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/innovacion/drones-parques-eolicos>
- Iberdrola. (s.f.). *Mantenimiento predictivo: la técnica basado en datos clave para anticipar errores*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2021, de <https://www.iberdrola.com/innovacion/mantenimiento-predictivo>
- Iberdrola. (s.f.). *Qué es la energía eólica marina*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-funciona-la-energia-eolica-marina>
- Iberdrola. (s.f.). *Qué es la energía eólica terrestre*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/como-funcionan-parques-eolicos-terrestres#:~:text=Los%20parques%20e%C3%B3licos%20se%20instalan,El%20impacto%20ambiental.>
- Iberdrola. (s.f.). *Qué es un aerogenerador y como funciona*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>
- Jiménez Simón, N., & Cobreiro Rodríguez, P. (2014). *Aerogeneradores: Riesgos y medidas de prevención y protección*. Obtenido de Manualzz:

- <https://manualzz.com/doc/5463570/aerogeneradores--riesgos-y-medidas-de-prevenci%C3%B3n-y-protec...>
- Microsegur. (s.f.). *Tipos de cámaras termográficas*. Obtenido de <https://microsegur.com/tipos-de-camaras-termograficas/>
- Munguía, S. F. (21 de Marzo de 2018). *Diario Renovables*. Recuperado el 15 de Octubre de 2021, de <https://www.diariorenovables.com/2018/03/primer-parque-eolico-marino-del-mundo.html>
- Munguía, S. F. (21 de Marzo de 2018). *Un poco de historia. Vindeby Offshore Wind Farm, el primer parque eólico marino del mundo*. Obtenido de Diaro Renovables: <https://www.diariorenovables.com/2018/03/primer-parque-eolico-marino-del-mundo.html>
- Munguía, S. F. (9 de Septiembre de 2021). *Miles de aerogeneradores se acercan al final de su vida útil, la gran pregunta es qué haremos con sus palas después*. Obtenido de Xataka: <https://www.xataka.com/energia/miles-aerogeneradores-se-acercan-al-final-su-vida-util-gran-pregunta-que-haremos-sus-palas-despues-1>
- Munguía, S. F. (9 de Septiembre de 2021). *Xataka*. Recuperado el 15 de Octubre de 2021, de <https://www.xataka.com/energia/miles-aerogeneradores-se-acercan-al-final-su-vida-util-gran-pregunta-que-haremos-sus-palas-despues-1>
- NovoDrone. (2022). *Tipos de drones*. Obtenido de <https://novodrone.com/tipos-de-drones/>
- Observatorio Aeroespacial. (17 de Julio de 2020). *La evolución de los drones*. Obtenido de Esga: <https://www.esga.mil.ar/Observatorio/Informes/Informe%203-EVOLUCION-DE-LOS-DRONES%20COVID-19.pdf>
- Ofiteat. (20 de Noviembre de 2020). *Cámaras termográficas sobre drones, una solución de altura*. Obtenido de <https://ofiteat.com/camaras-termograficas-sobre-drones-una-solucion-de-altura/>
- Parrot Drones. (30 de Abril de 2021). *Anafi USA*. Obtenido de https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2022-02/white-paper-anafi-usa-v1.5.3_en.pdf

- Preditec. (s.f.). *Cámaras termográficas para el mantenimiento industrial*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2022, de <http://www.preditec.com/productos/equipos-de-infrarrojos/camaras-termograficas-para-mantenimiento-industrial/>
- Premium. (8 de Marzo de 2017). *Premium Energía*. Recuperado el 9 de Enero de 2022, de <https://premiumenergia.es/historia-de-la-energia-eolica/#:~:text=La%20primera%20y%20m%C3%A1s%20inmediata,palas%20de%20madera%20o%20ca%C3%B1a>.
- PreOlix. (s.f.). *Aprendiendo sobre inspecciones de palas de aerogeneradores usando drones*. Obtenido de <https://preolix.com/aprendiendo-sobre-inspecciones-de-palas-de-aerogeneradores-usando-drones/>
- Reve. (23 de Junio de 2021). *Anuario Eólico 2021: un análisis de la situación actual de la eólica en España*. Obtenido de <https://www.evwind.com/2021/06/23/anuario-eolico-2021-un-analisis-de-la-situacion-actual-de-la-eolica-en-espana/#:~:text=En%20Espa%C3%B1a%20hay%201.265%20parques,2%25%20m%C3%A1s%20que%20en%202019>.
- Revista Empresarial y Laboral. (2018). 7 aplicaciones profesionales de un dron. *Empresarial y Laboral*.
- Rodríguez, A. (s.f.). *Tipos de drones y sus características*. Obtenido de Iberfdrone: <https://iberfdrone.es/tipos-drones-y-caracteristicas/>
- SG Drones Solutions. (s.f.). *Las inspecciones preventivas con drones en aerogeneradores detectan fallos de manera rápida y segura*. Obtenido de <https://sgdrones.es/inspecciones-tecnicas-en-eolica/>
- Talva, M.-A. (6 de Julio de 2021). *Los 5 niveles de mantenimiento correctivo y preventivo*. Obtenido de Mobility Work: <https://mobility-work.com/es/blog/niveles-mantenimiento-correctivo-preventivo>
- Teledyne Flir. (12 de Marzo de 2020). *Imágenes térmicas para mantenimiento preventivo en turbinas eólicas*. Obtenido de <https://www.flir.es/discover/instruments/utilities/thermal-imaging-for-preventative-maintenance-on-wind-turbines/#:~:text=La%20termograf%C3%ADa%20puede%20detectar%20una,%20pala%20y%20mucho%20m%C3%A1s>.

- Twenergy. (5 de Noviembre de 2019). *Condiciones de instalación de la energía eólica: ¿Dónde se colocan los molinos?* Obtenido de <https://twenergy.com/energia/energia-eolica/como-se-elige-la-mejor-zona-para-instalar-molinos-de-viento-1469/>
- UAV Technology. (07 de Abril de 2016). *El origen y la historia de los drones*. Obtenido de Hemav: <https://hemav.com/el-origen-y-la-historia-de-los-drones/>
- Wikipedia. (30 de Junio de 2022). *Gyrodyne QH-50 Dash*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Gyrodyne_QH-50_DASH
- Wikipedia. (5 de Mayo de 2022). *Mantenimiento*. Recuperado el 5 de Junio de 2022, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Mantenimiento#:~:text=Se%20define%20el%20mantenimiento%20como,acciones%20t%C3%A9cnicas%20y%20administrativas%20correspondientes.>
- Zona Eólica Canaria S.A. (2017). *Guía para el mantenimiento y operación de parques eólicos marinos*. Las Palmas. Obtenido de http://www.zecsa.org/cmsAdmin/uploads/o_1c33dpqn01ktdqij6kfl8ikfkaa.pdf
- Zorua, A. (2 de Diciembre de 2019). *Historia de la regulación dron española*. Obtenido de XOdronics: <https://exodronics.com/es/historia-regulacion-dron-espanola/>