



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

INFRAESTRUCTURAS INTELIGENTES. APLICACIÓN AL MANTENIMIENTO DE AEROGENERADORES.

Autor: Marcos Suárez Rosado

Tutor: D. Antolín Lorenzana Iban

2º Tutor: D. Álvaro Magdaleno González

Valladolid, septiembre, 2021



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

INFRAESTRUCTURAS INTELIGENTES. APLICACIÓN AL MANTENIMIENTO DE AEROGENERADORES.

Autor: Marcos Suárez Rosado

Tutor: D. Antolín Lorenzana Iban

2º Tutor: D. Álvaro Magdaleno González

Valladolid, septiembre, 2021

Resumen.

Actualmente la sociedad industrial está inmersa en un profundo cambio tecnológico, orientado a la optimización de los procesos y la mejora en la gestión de los recursos existentes. Desde este punto de vista es interesante incorporar sistemas capaces de mejorar el funcionamiento y la eficiencia de construcciones de responsabilidad, dotando a alguna de sus estructuras de cierta "inteligencia".

El trabajo se enfoca al campo de los aerogeneradores, que constituyen un tipo concreto de infraestructura que aúna características estructurales, productivas, económicas y medioambientales, de interés para el desarrollo de las energías renovables a nivel mundial.

Se proponen y detallan las posibilidades y mejoras que presentan las recientes innovaciones en el campo de la monitorización estructural, la cual permite abaratar el coste de operación y mantenimiento, alargar su vida útil, así como mejorar su planificación y su gestión.

Palabras clave.

Infraestructura inteligente, mantenimiento, monitorización, aerogenerador, vida útil.

Abstract.

Industrial society is currently immersed in a profound technological change, aimed at optimising processes and improving the management of existing resources. From this point of view, it is interesting to incorporate systems capable of improving the operation and efficiency of constructions of responsibility, endowing some of their structures with a certain "intelligence".

The work focuses on the field of wind turbines, which constitute a specific type of infrastructure that combines structural, productive, economic and environmental characteristics of interest for the development of renewable energies worldwide.

It proposes and details the possibilities and improvements presented by recent innovations in the field of structural monitoring, which allow lowering the cost of operation and maintenance, extending their useful life, as well as improving their planning and management.

Key words.

Intelligent infrastructure, maintenance, monitoring, wind turbine, useful life.

Índice general.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes.....	1
Objetivos.....	2
Motivación.	3
Organización de la memoria.	3
CAPÍTULO 2. ENCUADRE GENERAL Y ESTADO DEL ARTE DE LAS INFRAESTRUCTURAS INTELIGENTES.....	5
2.1. Infraestructuras inteligentes.	5
2.1.1. Ciudad/territorio inteligente o Smart city/territory.....	6
2.1.2. Revoluciones industriales y contexto actual en la UE.	10
2.1.3. Sectores de aplicación de las infraestructuras inteligentes.	14
2.1.4. Monitorización de una estructura inteligente.	15
2.2. TICs y soluciones tecnológicas.	17
2.2.1. IoT.	17
2.2.2. IA (Redes neuronales y control inteligente).....	17
2.2.3. <i>BigData</i>	18
2.2.4. <i>SmartGrid</i> / Redes inteligentes de distribución eléctrica.	18
2.2.5. 5G.....	19
2.2.6. Digital Twin.	19
2.2.7. Sensor.	20
2.2.8. Machine learning.	20
2.2.9. SCADA.	21
2.3. Monitorización de la salud estructural / Structural Health monitoring.....	22
2.3.1. Técnicas utilizadas en monitorización de estructuras y componentes.	23
2.3.2. Tipologías de monitorización.	29
2.4. Mantenimiento en la ingeniería.	31
2.4.1. Mantenimiento correctivo.....	32
2.4.2. Mantenimiento preventivo.....	32
2.4.3. Mantenimiento predictivo.	33
2.5. Monitorización de la condición / Condition monitoring.....	35
2.5.1. Trend monitoring.....	36
2.5.2. Condition Checking.....	37

CAPÍTULO 3. AEROGENERADORES EÓLICOS. CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS PRINCIPALES.....	38
3.1. Energía eólica.....	38
3.1.1. Organización del negocio de la energía eólica.....	39
3.1.2. Elementos clave y situación actual de la eólica marina en España.	40
3.2. Descripción técnica del aerogenerador y sus componentes.....	42
3.2.1. Cimentación.....	42
3.2.2. Torre.....	43
3.2.3. Góndola.....	44
3.2.4. Rotor eólico.	46
3.3. Regulación, control y comunicación.	48
CAPÍTULO 4. ANALISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN.	50
4.1. Métodos y conceptos del monitoreo por condición en aerogeneradores. Técnicas CMS y FDS.....	55
4.1.1. Detección de fallos en aerogeneradores.....	56
4.1.2. Fallos más severos sufridos por los aerogeneradores.	59
4.2. Sistema de monitorización de la condición para el mantenimiento predictivo en aerogeneradores.	61
4.2.1. Fundamentos de las técnicas de Condition Monitoring.	62
4.3. Costes en la industria eólica.	65
4.3.1. Coste del uso de la energía eólica.....	65
4.4. Beneficios económicos y operacionales de la implementación de sistemas de monitorización para el mantenimiento predictivo basados en la condición.	68
CAPÍTULO 5. CASO DE ESTUDIO. PROPUESTA DE APLICACIÓN EN UN PARQUE EÓLICO TIPO.....	73
5.1. Opción 1: operación hasta agotar la vida útil.....	75
5.2. Opción 2: repotenciación.	75
5.3. Opción 3: extensión de vida útil.	75
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	78
Líneas futuras.	79
Consideraciones adicionales.	79
BIBLIOGRAFÍA.....	80

Índice ilustraciones.

Ilustración 1. Plan de actuación Smart Mobility Santander [8].	9
Ilustración 2. Áreas Smart en un territorio inteligente [7].	12
Ilustración 3. Sectores de aplicación de las estructuras inteligentes.	14
Ilustración 4. Proceso de gestión y control de una estructura inteligente.	16
Ilustración 5. Elementos de IoT [23].	17
Ilustración 6. Digital Twin de un aerogenerador [29].	20
Ilustración 7. Funcionamiento de una red de Bragg de fibra óptica [33].	23
Ilustración 8. Acelerómetro piezoeléctrico [36].	24
Ilustración 9. Acelerómetro piezoresistivo [36].	25
Ilustración 10. Acelerómetro mecánico [36].	25
Ilustración 11. Acelerómetro térmico [36].	26
Ilustración 12. Acelerómetro capacitivo [36].	26
Ilustración 13. Inspección termográfica de un aerogenerador eólico [38].	28
Ilustración 14. Gráfica del proceso de deterioro de un equipo o máquina en función del tiempo de operación [42].	36
Ilustración 15. Principales cifras del sector eólico en España, en Europa y en el mundo [43].	39
Ilustración 16. Organización del negocio de la energía eólica.	40
Ilustración 17. Potencia eólica offshore mundial acumulada a finales de 2020 [44].	40
Ilustración 18. Componentes principales de un aerogenerador eólico [49].	42
Ilustración 19. Capas de la estructura del sistema de control y monitorización ideal de un aerogenerador.	48
Ilustración 20. Evolución de la antigüedad del parque eólico español (MW) [43].	50
Ilustración 21. Evolución de los costes de OyM durante la vida útil de un parque eólico. Fuente: Siemens Gamesa Renewable Energy.	53
Ilustración 22. Esquema del enfoque basado en modelos [58].	58
Ilustración 23. Número de fallos en comparación con el tiempo de inactividad por componente para parque eólicos. Elaboración propia en base a [61].	60
Ilustración 24. Costes de instalación por áreas. Elaboración propia en base a datos [43].	65
Ilustración 25. Porcentajes de coste estimados por componente. Elaboración propia en base a datos [43].	66
Ilustración 26. Costes generales en el ciclo de vida de un parque eólico. Elaboración propia en base a datos [43].	67

Ilustración 27. Estrategia de monitorización CMSWind [63].	69
Ilustración 28. Impacto potencial sobre el ahorro de costes en un parque eólico relativo a las innovaciones en OyM [64].	71
Ilustración 29. Impacto potencial sobre el ahorro de costes en un parque eólico asociados a las innovaciones en OyM [64].	71

Índice tablas.

Tabla 1. Dimensiones Smart City bajo el prisma europeo, Elaboración propia basada en el informe Mapping Smart Cities in the EU de la Comisión Europea [6].....	8
Tabla 2. Comparativa extensión de vida – repotenciación. Elaboración propia basada en [43].	51
Tabla 3. Costes de explotación generales en proyectos eólicos. Elaboración propia basada en [62].	66

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

Antecedentes.

Actualmente en los países más desarrollados no existe tanta necesidad de construir nuevas infraestructuras¹ como sí de mantener en un estado óptimo las ya existentes y garantizar las funciones para las que fueron construidas y diseñadas tanto en el ámbito industrial como en el civil.

El concepto de vida útil hace referencia al periodo de tiempo durante el cual una infraestructura es capaz de soportar con las mayores garantías posibles las solicitudes, tanto internas como externas para las que fue diseñada. Atendiendo a este concepto y debido al envejecimiento de los distintos elementos materiales de la estructura, se alcanza el final de su vida útil, por lo que es de esperar que su comportamiento no sea óptimo y se originen fallos estructurales graves causados por la pérdida de prestaciones de los materiales, que comprometan tanto la seguridad para las personas que hacen uso de la misma, como para la viabilidad económica de su mantenimiento.

Además, es muy frecuente que aparezcan deterioros mucho tiempo antes de alcanzar dicha vida útil, siendo necesaria su inspección periódica, así como la realización de trabajos de mantenimiento preventivos para evitar posibles fallos que pongan en peligro el correcto funcionamiento de la estructura y más aún si se trata de una infraestructura formada por máquinas o equipos con diversas partes móviles.

Es conocido que el sector de la construcción tanto industrial como civil, no ha experimentado cambios profundos a lo largo de la historia en relación a la hoja de ruta de un proyecto constructivo, evidenciando la incorporación de nuevas técnicas de ejecución y producción, pero de una forma puntual y a medida que ha sido necesario. Debido a lo anterior, ambos sectores no han sido capaces de avanzar al mismo ritmo que otros, como puede ser la automoción o la aviación, en cuanto a la modernización y a la productividad se refiere, en los que ya están más que consolidados los sistemas de monitorización y sensorización, consiguiendo una respuesta mucho más óptima de sus sistemas productivos.

Es por esto, que la tendencia actual dentro del marco de referencia de la Industria 4.0, este enfocada a la implementación de sistemas inteligentes de sensorización y monitorización estructural, capaces de analizar, prever, controlar y comunicar, con suficiente antelación cualquier anomalía que pueda estar sufriendo una estructura, máquina o sistema; de manera que no se llegue a producir un fallo o incluso lleve asociado un posible colapso. Por tanto, se ha de tender a estrategias de mantenimiento más sofisticadas, eficientes y óptimas, de forma que sea posible reducir significativamente el coste de su mantenimiento, así como conseguir la consolidación de la viabilidad económica de este nuevo enfoque de la ingeniería.

¹Según la RAE, una infraestructura es el conjunto de elementos, dotaciones y servicios necesarios para el buen funcionamiento de un país, de una ciudad o de una organización cualquiera, definición en la cuál es posible incluir a un aerogenerador eólico, como se verá más adelante.

Por todo esto, resulta de interés la realización de un estudio que englobe el estado actual de desarrollo en el que se encuentran las distintas corrientes de investigación, metodologías y enfoques en todos estos campos, a fin de ofrecer una visión global y conceptual de dichas corrientes investigadoras; centrando finalmente el análisis en un sector de la ingeniería industrial de tanto interés como es la energía eólica y en el que a día de hoy es necesario desarrollar nuevas metodologías en labores de operación y mantenimiento.

Finalmente, poniendo el foco de atención en la problemática que sufre el sector de la energía eólica en España respecto a la acusada antigüedad de gran parte de su parque eólico, es necesario buscar, desarrollar e implementar nuevas estrategias operacionales y de mantenimiento basadas en la aplicación de novedosas tecnologías inteligentes que permitan extender la vida útil de dichos parques. Extender la vida útil de los parques desde los 20 a los 30 años de operación en unas condiciones adecuadas de funcionamiento y producción de energía supone un gran reto para la industria, pero que parece que puede ser una opción muy a tener en cuenta.

Objetivos.

Como objetivos principales en el desarrollo del TFM, se encuentra en primer lugar llevar a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica del estado del arte del campo de las estructuras inteligentes en relación a la actual corriente de la Industria 4.0, comprendiendo éstas los diferentes enfoques ingenieriles y las principales líneas de investigación sobre las mismas, como pueden ser la implementación de las *Smart cities & territories*, las distintas soluciones tecnológicas (TICs) que hacen posible su desarrollo, así como las tecnologías y metodologías existentes en proceso de investigación dentro del campo de la monitorización y la sensorización estructural.

Seguidamente y como objetivo específico del presente TFM dentro del campo de la ingeniería industrial, se llevará a cabo un estudio comparativo sobre las distintas técnicas y alternativas para la sensorización y monitorización de aerogeneradores eólicos, incluyendo una contextualización previa que ilustre los motivos por los cuales estas aplicaciones resultan críticas para conseguir una gestión más óptima de su mantenimiento, en relación con las técnicas convencionales. Lo anterior permitiría una significativa reducción de costes, haciendo aún más viable económicamente la producción energía eólica, así como ampliar sus condiciones de seguridad.

El motivo por el cual se ha decidido centrar el estudio en los aerogeneradores es debido a que se trata de una estructura industrial de suma importancia en el ámbito de la producción de energía eléctrica renovable, de ahí la búsqueda de mejoras en su desarrollo y control. Un aerogenerador está formado tanto por componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, como por su propia estructura, por lo que se cree que es el ejemplo idóneo para el estudio de caso en este trabajo, considerando de esta forma al aerogenerador como una estructura industrial inteligente.

Como objetivo de la propuesta del caso de estudio se pretende ofrecer de una forma simplificada una visión acerca de la problemática que sufre el sector de la energía eólica en relación a la antigüedad de gran parte de sus aerogeneradores. A su vez,

mostrar que mediante la aplicación de novedosas tecnologías inteligentes de sensorización y monitorización que permitan desarrollar planes de mantenimiento más optimizados, es posible aumentar en las mejores condiciones posibles la vida útil de 20 años para la que inicialmente fueron diseñados los aerogeneradores y reduciendo a su vez los costes de operación y mantenimiento derivados.

Motivación.

En cuanto a la motivación personal que me lleva al desarrollo de este trabajo fin de máster está la puesta en valor y el afán por llevar a cabo un trabajo de competencias transversales dentro de la profesión de la Ingeniería Industrial, que englobe múltiples aspectos, tanto técnicos y específicos como ampliar los conocimientos en ámbitos más generales que me lleven a comprender cuales son las nuevas corrientes o enfoques dentro de la ingeniería actual. Por tanto, tengo como objetivo mejorar la capacidad investigadora y alcanzar la mayor amplitud de conocimiento posible tanto de lo que ocurre en el mundo y en la sociedad actual, como también de lo que necesita, para de una forma obtener una visión lo más clara posible previamente a desarrollar mi futuro profesional y laboral.

Específicamente, la decisión de realizar el estudio de caso sobre aerogeneradores está motivada por mi interés en los campos tanto de las estructuras, como en el de la energía, ya que considero que son dos ámbitos cruciales de la ingeniería industrial que están sumamente ligados y son a su vez interdependientes, actualmente y en el futuro próximo. A lo anterior se une la fuerte expansión que está sufriendo el campo de las energías renovables a nivel mundial desde hace algo más de una década, motivado principalmente por el cambio de rumbo de la sociedad y de la industria en general hacia el uso de energías limpias y la sostenibilidad. Igualmente, la actual vertiente de digitalización, así como el uso de nuevas tecnologías cada vez más sofisticadas, hace de especial interés el análisis de esta combinación de aspectos en un sistema de tan especial interés industrial como es un aerogenerador eólico, el cual como veremos más adelante reúne en mayor o menor medida dichos aspectos y características.

Organización de la memoria.

La organización de la memoria está basada de la siguiente forma:

- En primer lugar, se lleva a cabo un encuadre general del estado del arte de las infraestructuras inteligentes. Además, se presentan los diversos conceptos y tecnologías que afectan a este tipo de infraestructuras.
- Seguido de esto, se detallan las distintas características y parámetros técnicos que afectan a los aerogeneradores eólicos, los cuales representan el tipo de infraestructura inteligente a analizar de forma particular.
- A continuación, se lleva a cabo un profundo análisis sobre las distintas posibilidades y alternativas existentes para la monitorización y sensorización

de aerogeneradores, centradas en objetivos de mejora de las estrategias de operación y mantenimiento y las posibilidades que se presentan.

- Por último, se realiza un caso de estudio de aplicación de los distintos enfoques y metodologías estudiadas, a fin de determinar las distintas posibilidades de las que dispone un parque eólico tipo que se encuentra al final de su vida útil de diseño.

CAPÍTULO 2. ENCUADRE GENERAL Y ESTADO DEL ARTE DE LAS INFRAESTRUCTURAS INTELIGENTES.

2.1. Infraestructuras inteligentes.

En el presente capítulo se lleva a cabo una revisión bibliográfica sobre el estado del arte en el ámbito general de las infraestructuras inteligentes y las *Smart cities & territories*.

Actualmente, las estimaciones existentes indican que para el año 2030 más del 60% de la población mundial vivirá en ciudades y entornos urbanos, mientras que para 2050 este dato podría superar las dos terceras partes. Si se compara la tasa prevista de crecimiento demográfico en las poblaciones urbanas de todas las regiones a nivel mundial se puede observar que los países categorizados como de bajos ingresos sufrirán un crecimiento de la población urbana mucho más rápido que los países de rentas elevadas. Además, las ciudades acaparan aproximadamente el 70% del consumo mundial de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero, todo esto sin llegar a superar el 5% de ocupación de la superficie del planeta [1].

Esta tendencia lleva consigo un aumento sin precedentes del consumo de recursos tales como el agua, materiales de construcción, energía, alimentos, gestión de los residuos y herramientas contra la contaminación. Por consiguiente, estos entornos urbanos en crecimiento se verán obligados a mejorar la calidad de los servicios, incrementar la eficiencia y la eficacia de las medidas de gestión de todos los recursos necesarios para el correcto funcionamiento de todos los sistemas necesarios, así como de optimizar la gestión de estos recursos y sus residuos, sin perder la atención sobre la reducción de costes operacionales y de mantenimiento de las infraestructuras, las cuales serán las herramientas de interconexión e interrelación de todo lo mencionado antes.

En función de lo anterior y analizando la situación actual, cabe pensar que los entornos en los que se desarrolla la actividad humana deben orientarse hacia un enfoque de ciudades y territorios inteligentes, en el que mediante las tecnologías de información y comunicación (TICs) y ayudadas de otros sistemas y medios, como pueden ser el IoT (*Internet of things*) o el *BigData*, sean el soporte principal para aumentar la calidad de vida, la competitividad y los servicios urbanos, así como la optimización de su funcionamiento, garantizando al mismo tiempo las necesidades actuales y futuras en cuanto a aspectos sociales, económicos y medioambientales [2].

Poniendo el foco de atención en los países desarrollados, el objetivo principal es el de mantener los sistemas de infraestructuras ya existentes, de manera que estos no sean desechados por motivos relacionados con su coste de mantenimiento o adaptación, espacio útil y otros motivos. De esta forma la aplicación de sistemas de infraestructuras inteligentes está enfocada en su mayoría a optimizar el uso de las infraestructuras ya existentes y la gestión y el control de los recursos de los que ya se dispone, a fin de satisfacer las necesidades de la sociedad en cuando a desarrollo sostenible se refiere.

Por tanto, las infraestructuras inteligentes son los elementos principales entorno a los cuales se forman las ciudades y territorios inteligentes, siendo su característica principal la necesidad de estar conectados e integrados, generando un flujo continuo de datos, de forma que realizando un correcto control y gestión de dichos datos y mediante el uso de herramientas de control inteligente (las cuales se estudiarán más adelante) permitirán la optimización del rendimiento y de los recursos. A continuación, se indican algunos de los principales componentes de una infraestructura inteligente:

- Edificios inteligentes.
- Movilidad inteligente.
- Inteligencia energética.
- Gestión inteligente del agua.
- Gestión inteligente de los residuos.
- Atención de salud inteligente.
- Capas digitales inteligentes.
 - Urbana
 - Sensorización
 - Conectividad
 - Análisis de datos
 - Automatización
- Ciclo de vida de los activos.
- Actualizaciones de mantenimiento/servicio.
- Almacenamiento.
- Seguridad.

2.1.1. Ciudad/territorio inteligente o *Smart city/territory*.

El concepto de ciudad o territorio inteligente, en inglés *Smart City* o *Smart Territory*, es un concepto relativamente nuevo y emergente cuyas definiciones son muy diversas, por lo que no está completamente definido. Cabe apuntar que, de manera general, el concepto *Smart City* hace referencia a lo que sería una ciudad o núcleo urbano y el concepto *Smart Territory* a un territorio más grande o región.

Desde un punto de vista tecnológico, es posible decir que una *Smart City* es un sistema eco sostenible de gran complejidad, formado por diversos subsistemas ligados entre sí y diversas funcionalidades [2]. Así mismo, se define la *Smart City* como “El uso de la computación inteligente para hacer que los servicios e infraestructuras críticas de una ciudad, en los que se incluyen la administración, educación, sanidad, seguridad pública, edificios, transporte y empresas sean más inteligentes, eficientes y estén más interconectados” [2]. Por otra parte, también se puede definir como “una ciudad que monitoriza e integra las condiciones de todas sus infraestructuras críticas”, siendo destacable en este caso la capacidad de monitorizarse y responder ante ciertas situaciones que puedan ocurrir en ella [3].

En otros casos, se pone el énfasis en la integración orgánica de los sistemas de la ciudad, considerando a la *Smart City* como un sistema de sistemas [4], es decir un conjunto de sistemas interconectados que funcionan como un único organismo. De forma que dicho organismo está formado por un sistema nervioso artificial que le dota

de inteligencia y coordinación. Esta inteligencia, se basa en la combinación efectiva de redes de telecomunicación y TICs, que serían sus nervios, la inteligencia integrada, considerada su cerebro, los sensores que serían sus sentidos y el software, que actuaría como sistema cognitivo. Además de esto, existe una proliferación de conexiones directas con los sistemas mecánicos y eléctricos de los edificios, maquinas, electrodomésticos, sistemas de transporte, redes eléctricas, plantas industriales y otras redes de suministro de energía, agua y de sistemas de evacuación, que proporcionan la seguridad y gestión de los sistemas para garantizar las mejores condiciones de cualquier actividad humana.

Por otra parte, existen definiciones que destacan aspectos diferentes [5], donde se da más importancia al impacto que las *Smart Cities* provocan en los habitantes, en la economía, en el gobierno, en el medio ambiente, en la movilidad y en la vida en general en la ciudad.

En función de las definiciones de *Smart City* mencionadas y algunas otras con diversos enfoques [2], es posible identificar en ellas tres categorías de factores o aspectos principales: el tecnológico, el humano y el institucional.

El factor tecnológico se refiere a las infraestructuras de hardware y software. La tecnología es fundamental para dotar a una ciudad de “inteligencia”, ya que el uso de las tecnologías de la información es capaz de transformar la vida y el trabajo de una manera muy importante. A su vez, mediante la computación inteligente, de la que se hablaba en párrafos anteriores, formada por una nueva generación de sistemas hardware, software y tecnologías de red dotan a los sistemas de una conciencia del entorno en tiempo real y capacidades analíticas avanzadas, ayudando a las personas a tomar decisiones más óptimas.

En cuanto a las competencias técnicas que deben tener las personas que formen parte de un territorio inteligente, cabe destacar que es preciso disponer de una capa digital o de datos en todas las operaciones relevantes, superando los problemas que puede suponer tratar con mayores volúmenes de tecnologías diferentes, así como de garantizar el funcionamiento integrado de las distintas áreas que forman el sistema inteligente. De esta forma, evidenciando las competencias de los técnicos responsables de la gestión de los sistemas, algunas de las competencias de los recursos humanos podrían ser conceptos como la ciudadanía digital, la alfabetización, el diseño o el conocimiento de aplicación de gestión de datos básico. Es decir, actualmente resulta necesario no solo invertir en tecnología inteligente, sino en la formación y educación de la sociedad en la utilización de estos sistemas.

Respecto al factor institucional, es importante destacar que el apoyo del gobierno y las políticas de gobierno son esenciales para el diseño e implementación de las iniciativas para la creación de *Smart Cities*. Además, es fundamental establecer un entorno administrativo, formado por iniciativas, compromiso y una estructura definida, que de apoyo a las ciudades y entornos inteligentes. El gobierno, simplemente es el encargado de regular los resultados de los sistemas económico y social, relacionándose de forma dinámica con ciudadanos, comunidades y empresas en tiempo real para impulsar el crecimiento, la innovación y el progreso.

Según el informe *Mapping Smart Cities in the EU* de la Comisión de Industria, Investigación y Energía del Parlamento Europeo [6], se considera que una ciudad o territorio es inteligente si tiene al menos una iniciativa que aborde una o más de los siguientes atributos (Tabla 1):

Tabla 1. Dimensiones Smart City bajo el prisma europeo, Elaboración propia basada en el informe *Mapping Smart Cities in the EU* de la Comisión Europea [6].

DIMENSIONES SMART CITY BAJO EL PRISMA EUROPEO	
ATRIBUTO	DEFINICIÓN
Smart Economy	<ul style="list-style-type: none"> Espíritu innovador Imagen y marca Productividad Emprendimiento activo Flexibilidad del mercado de trabajo Teletrabajo Inserción internacional
Smart People	<ul style="list-style-type: none"> Aprendizaje continuo (Metodología Lean) Nivel de cualificación Mente abierta Pluralidad étnica
Smart Environment	<ul style="list-style-type: none"> Calidad del aire (no contaminación) Condiciones medioambientales Gestión sostenible de los recursos Concienciación ecológica
Smart Mobility	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilidad de infraestructura TI Accesibilidad local e (inter)nacional Sostenibilidad del sistema de transporte
Smart Living	<ul style="list-style-type: none"> Calidad de la vivienda Facilidades educativas y culturales Condiciones de salud e higiene Seguridad individual Atractivo turístico Bienestar económico
Smart Governance	<ul style="list-style-type: none"> Garantía de servicios públicos y sociales Gobernanza transparente Participación en la vida pública

De los seis atributos anteriores, los proyectos más desarrollados son los relacionados con *Smart Environment* y *Smart Mobility*, que representan respectivamente, el 21% y 33% de las actuaciones. Mientras tanto, cada uno de los otros cuatro atributos son considerados en aproximadamente un 10% de las ciudades y territorios catalogados como inteligentes a nivel europeo. En particular, España se encuentra entre los países con más presencia en proyectos de *Smart Governance* y *Smart Mobility* [7].

Por ejemplo, uno de los principales problemas en el ámbito de la movilidad y directamente relacionado con la sostenibilidad es la congestión del tráfico, la cual produce un alto consumo energético y produce un impacto negativo en la calidad de vida. En este sentido, y con el objetivo de reducir estos problemas, la ciudad de Santander por ejemplo (Ilustración 1), ha empezado a aplicar una gestión inteligente de los aparcamientos mediante un amplio despliegue de sensores instalados en las plazas de aparcamiento de las principales zonas de la ciudad, de forma que se conoce cualquier cambio de ocupación de una plaza, se detectan vehículos en las zonas de carga o descarga, en zonas de aparcamiento reservadas a personas con movilidad reducida o en las paradas de autobús [8].



Ilustración 1. Plan de actuación Smart Mobility Santander [8].

Por otra parte, el Gobierno inteligente o *Smart Governance* pretende transformar la gestión de los entornos a través de la interacción y el análisis de diferentes fuentes de información en tiempo real y el Internet of Things, permitiendo a los diferentes agentes gubernamentales y entidades público-privadas colaborar entre ellos con el objetivo de innovar en nuevos productos y servicios adaptados a las necesidades actuales que demanda la sociedad, aumentando de esta forma la eficiencia, la simplificación y la automatización de procesos administrativos, para centrarse en disponer de un sistema de información que se encargue de la dirección y gestión del entorno [9].

2.1.2. Revoluciones industriales y contexto actual en la UE.

Parece necesario encuadrar el momento actual mediante el enfoque de las revoluciones industriales, cada una con un marcado cambio dentro de los paradigmas sociales y científicos [10], ya que cada revolución industrial ha tenido su repercusión e impacto tanto en el ámbito de la ingeniería como en el de la construcción.

Durante la primera revolución industrial, la mecanización de los procesos productivos supuso la transformación socioeconómica desde lo artesanal hacia lo industrial. En términos generales estuvo marcado por el uso del carbón, el hierro y el desarrollo de los sistemas motorizados de vapor. En cuanto al campo de la construcción, la utilización de hierro fundido y forjado propiciaron cambios en el diseño y en los métodos constructivos.

La segunda revolución industrial propició el uso del acero, el petróleo, la energía eléctrica y, por consiguiente, la producción en masa, no obstante, esta se vio afectada en cierto modo por la modularización de los procesos. El acero y el hormigón se convierten en nuevos materiales imprescindibles en la arquitectura, la construcción y la ingeniería, siendo de igual importancia a día de hoy.

Durante la tercera revolución industrial, la utilización de la electrónica y las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) permitió la automatización. Además, el ordenador comenzó a usarse en la fase de diseño en proyectos de arquitectura e ingeniería, convirtiéndose en una herramienta imprescindible en cualquier proceso creativo. Por otra parte, la informatización de los cálculos, junto con el desarrollo de nuevos materiales como el hormigón pretensado, supusieron un salto cualitativo en la fase de proyecto.

Hoy en día, la cuarta revolución industrial [11] se basa principalmente en la utilización e implementación de sistemas ciberfísicos [12]. La difusión del uso de internet, la digitalización, pero especialmente la sensorización y el internet de las cosas (IoT) están brindando nuevas oportunidades, principalmente en el ámbito de la optimización de procesos, mediante su combinación con la Inteligencia Artificial (IA) y el aprendizaje profundo y continuo para la mejora en la gestión de los datos generados. La impresión 3D y la realidad virtual aumentada en este sentido resulta clave, ya que permite la creación rápida y eficiente de prototipos a partir de modelos virtuales que pueden resultar de gran interés en las fases de diseño. De esta forma, es posible probar y simular propuestas creativas e innovadoras en el prototipo garantizando la constructibilidad general en cualquier fase, posibilitando la producción personalizada.

Actualmente, se anuncia la quinta revolución industrial [13]. En comparación con la industria 4.0 centrada principalmente en aspectos económicos tecnológicos, tiene en cuenta además la sostenibilidad ambiental y social. El cambio climático, la creación de redes, la creciente digitalización y un mundo globalizado traen nuevos desafíos para los centros residenciales, las casas, los barrios, las ciudades y los territorios en general. La pandemia actual de Covid-19 también requiere un enfoque diferente, siendo necesario redefinir las configuraciones de espacios abiertos, socialmente orientados y privados, así como la relación con el entorno natural.

Según Eurostat [14], en 2019, los hogares de la UE gastaron en “Vivienda, agua, electricidad, gas y otros combustibles” más del 12,3% del PIB de la UE. Sin duda, este es el mayor gasto en los hogares de la UE, representando casi una cuarta parte del total (23,5%). No obstante, estas cifras incluyen grandes diferencias entre los distintos propietarios o arrendatarios. En el mismo sentido, las viviendas vacías conviven a su vez con la escasez de las mismas en otros lugares. Observando los conceptos anteriores, toma importancia el impulso de las políticas de viviendas y espacios vitales con el objetivo de aumentar el bienestar social [15].

Desde la perspectiva de la sostenibilidad, los edificios consumen más del 40% del consumo energético total de la UE. Además, suponen el 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el consumo de energía. No obstante, hoy en día solo el 1% de los edificios se someten a una renovación eficiente anualmente [16].

Actualmente, debido a la crisis de COVID-19, la vivienda se ha convertido en algo sumamente importante, aumentando de esta forma el consumo de energía y recursos en los hogares en relación al aumento del tiempo de estancia y a los mayores requisitos de digitalización asociados, propiciados por el distanciamiento social [17].

Por esto, toma una elevada importancia la orientación de las prácticas sociales de consumo hacia un panorama en el que la sostenibilidad y la impulsión de los sistemas de producción de energía limpia (energía eólica, fotovoltaica...etc.) tomen un valor prioritario y dispongan de garantías suficientes para su desarrollo.

El nuevo Pacto Verde Europeo [16] prevé abordar la contaminación y su cambio climático asociado, consiguiendo que la sostenibilidad sea más tangible, cercana y atractiva a través de un buen diseño de los lugares de residencia de los ciudadanos.

Conceptos como la circularidad o la integración de soluciones para las personas basadas en la naturaleza, se encuentran como hoja de ruta en la estrategia. Además, la vivienda accesible y asequible, desde un aspecto más detallado, cubre el uso de la energía, los materiales, el agua, la calidad y el valor de los edificios, la comodidad, la resiliencia respecto al cambio climático y el coste del ciclo de vida. También debería contribuir a mejorar la eficiencia energética en los edificios, así como a duplicar la tasa de renovación en los próximos años. Por otra parte, cabe destacar la necesidad de llevar el foco también a la ingeniería civil circundante y a las comunicaciones destinadas a la infraestructura, el transporte, de forma que trascienda el concepto de que lo *Smart* y la sostenibilidad no sea solo a nivel local sino también global, es decir, que llegue a todos los territorios. De una forma esquemática, en la (Ilustración 2) se pueden observar las distintas áreas *Smart* que forman un territorio inteligente [7].

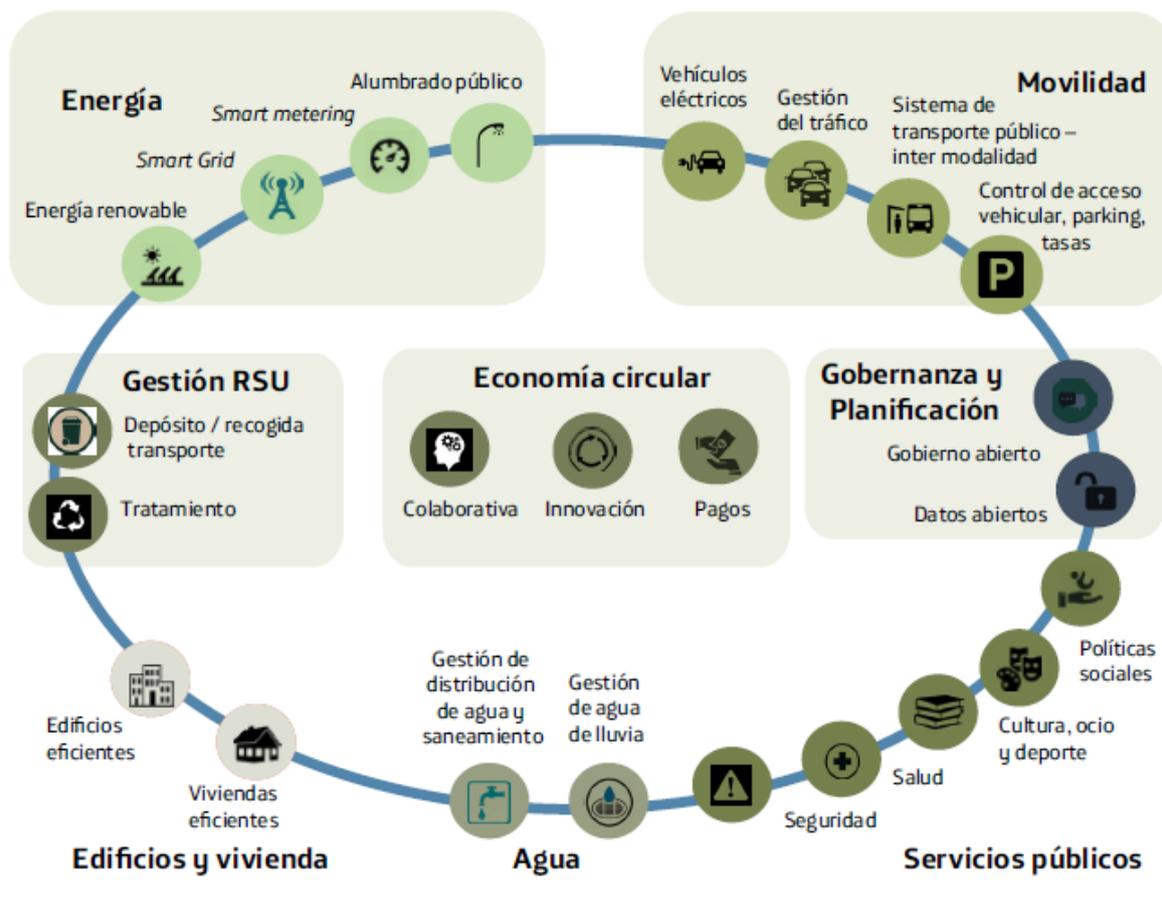


Ilustración 2. Áreas Smart en un territorio inteligente [7].

El documento “Renovation Wave”[17] se centra principalmente en la renovación del parque inmobiliario europeo desde la perspectiva de la sostenibilidad ambiental y social, incidiendo en que los niveles actuales de explotación de recursos materiales, energía, agua, alimentos y suelo no son sostenibles. Por tanto, es necesario un cambio en la manera de abordarlo, tratando la naturaleza respecto a cómo los humanos producen y consumen, trabajan, viven, se nutren, producen, viajan, transportan las mercancías y hacen uso de esos recursos. El plan para la recuperación posterior al COVID-19 NextGenerationEU [18] parece ser la base para el desarrollo. Este incluye una lista de varias vías de investigación con respecto a la construcción y sus aspectos relacionados, así como la propuesta de asociación Built4People, centrado en las personas para conseguir el diseño, la construcción, el mantenimiento, la operatividad, la rehabilitación y la reciclabilidad de los edificios y el entorno construido que impulsara la transición sostenible tan necesaria en la sociedad y la economía [19], siendo el compromiso de los ciudadanos con la sostenibilidad uno de sus pilares fundamentales.

También resulta necesario crear conciencia en cuanto a la situación actual, para poder responder rápidamente y de una forma más eficiente y específica a la irrupción de nuevos sistemas y metodologías colaborativas (Industria 4.0). El tratamiento los datos generados en tiempo real y probablemente masivo, debería ser a su vez uno de los puntos más destacables. Este aspecto podría permitir la implementación de medidas

preventivas en múltiples aspectos, siendo vitales los ciclos de retroalimentación estrechos en estos procesos, tanto preventivos como reactivos. En particular y como tema objetivo de estudio en este trabajo, el uso de sistemas de sensorización y monitorización en sistemas de producción de energía renovable como son los aerogeneradores eólicos, sería de gran ayuda en este sentido.

Seguido de lo anterior, el proceso de envejecimiento de las construcciones debe ser considerado tan importante como el desarrollo de nueva construcción, especialmente en términos de circularidad. Por tanto, en este contexto es indispensable compartir la información disponible, acelerando la implementación de metodologías colaborativas como BIM.

La metodología BIM (Building Information Modeling) que actualmente se está implementando en todo el mundo y que será obligatorio en un futuro cercano, tiene el potencial de transformar la industria de la construcción en general. BIM contiene y gestiona la información del proyecto de principio a fin, incluyendo además el ciclo de vida del producto, que junto con los datos e información generados por el Internet of things y la Inteligencia Artificial se pueden reutilizar, permitiendo un mejor seguimiento y rendimiento de la construcción [20].

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es que, a lo largo del ciclo de vida útil del proyecto, desde el punto de la construcción o edificación hasta su demolición y reciclaje, existe un proceso continuo de retroalimentación. Es decir, El modelo BIM centraliza toda la información de un proyecto (geométrica o 3D, tiempo o 4D, costes o 5D, medioambiental o 6D y mantenimiento o 7D) en un modelo digital desarrollado por todos sus agentes relacionados. Este modelo está inmerso en tiempo real en un proceso de modificación continuo de tal forma que en todo momento la realidad y el modelo son idénticos.

En particular, serán aprovechados al máximo las capas de diseño 6D y 7D durante la etapa de diseño en una infraestructura sostenible. La sexta dimensión o Green BIM brinda la oportunidad de conocer cuál será el comportamiento del proyecto antes de tomar las decisiones importantes y todavía con más antelación al comienzo y ejecución de la construcción. BIM permite la creación de variaciones e iteraciones en la envolvente, los materiales utilizados, el tipo de combustible utilizado para enfriar/calentar los habitáculos, incluso tener en cuenta su situación, su posición, su orientación y muchos otros aspectos. BIM 7D permite gestionar el ciclo de vida de un proyecto y sus servicios asociados, permitiendo el control logístico y operativo del proyecto durante su uso y mantenimiento durante su la vida útil, consiguiendo la optimización de procesos sumamente importantes como reparaciones, inspecciones y mantenimiento.

La circularidad en el diseño, pero también la infraestructura ecológica y la integración del paisaje son importantes desde la perspectiva del entorno natural. En general, el concepto de territorio inteligente, no solo de ciudades inteligentes, debe prevalecer y adquirir la importancia necesaria para conseguir su consideración. Actualmente, existen varios enfoques para abrir el concepto de ciudades inteligentes mediante la inclusión de infraestructuras inteligentes centradas en las personas [21].

2.1.3. Sectores de aplicación de las infraestructuras inteligentes.

Mediante el siguiente mapa conceptual (Ilustración 3) se pretende mostrar y poner de manifiesto la multidisciplinariedad de los campos donde las estructuras pueden ser consideradas como inteligentes, destacando los principales sectores industriales de aplicación de las mismas.

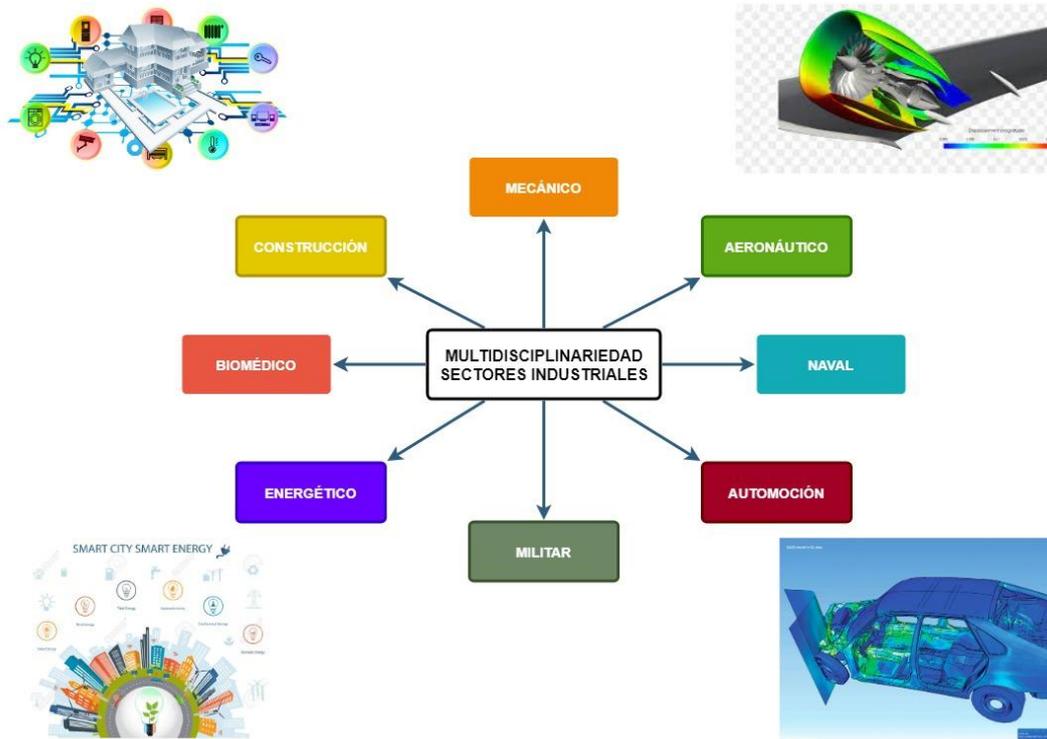


Ilustración 3. Sectores de aplicación de las estructuras inteligentes.

Actualmente, la mayor presencia de infraestructuras inteligentes se encuentra en sectores como el aeronáutico, el militar, el naval y la automoción, donde desde hace ya unos años la sensorización de numerosos parámetros en su funcionamiento se ha vuelto imprescindible, ya sea para conseguir optimizar al máximo su potencial como para garantizar la mayor seguridad para sus ocupantes.

Por otra parte, la aplicación de estructuras inteligentes en los sectores de la construcción y el energético se encuentra a día de hoy en plena expansión. Los motivos por los que en estos sectores ha sido más lenta su implementación son algunos de los expuestos en los apartados introductorios del trabajo. Por esos motivos, resulta de gran interés centrar el análisis principal del trabajo en los aerogeneradores eólicos, ya que se trata de un campo de la ingeniería que combina ambos sectores. No obstante, cabe destacar que la presencia de sistemas inteligentes en estructuras de edificación, ya sean de uso residencial, comercial/público, patrimonial o civil cada vez es mayor, siendo su principal objetivo dotarlas de las mejores condiciones de uso para sus usuarios y residentes, ya sean servicios múltiples, comodidad o garantías de seguridad, así como para aumentar su vida útil (rentabilidad y mantenimiento).

2.1.4. Monitorización de una estructura inteligente.

Tal y como se destacaba en párrafos anteriores, los ámbitos de aplicación de las estructuras inteligentes son cada vez más diversos.

Desde un punto de vista general, se pueden destacar cuatro bloques de proceso principales en la gestión de cualquier tipo de estructura inteligente [22]:

- Pre-proceso: se trata del proceso inicial, donde en primer lugar se lleva a cabo un análisis de los datos, parámetros y características generales de la estructura. De esta forma, será posible llevar a cabo el desarrollo del modelado estructural o también llamado *Digital Twin* (concepto descrito en 2.2. *TICs y soluciones tecnológicas*) mediante herramientas software, lo que permitirá disponer de un modelo digital de la estructura para facilitar los siguientes pasos. Seguido de esto, se determinarán el tipo de sensores más adecuados para la estructura analizada y la ubicación más óptima de estos sensores, de forma que se puedan obtener datos de los componentes más críticos y que más valor aporten a la gestión y el mantenimiento de la misma.
- Sensorización: una vez definida la ubicación más adecuada para los sensores, es el momento de llevar a cabo su instalación. El proceso de sensorización de la estructura está formado por la instalación tanto de los propios sensores como del sistema de monitorización, el cual es el encargado de la adquisición de los datos generados por los sensores, para su posterior digitalización y transmisión a través de las redes inalámbricas más adecuadas para cada caso. Por último, dichos datos serán almacenados para su análisis por el centro de control particular, si es el caso de una estructura independiente o un centro del control general si se trata de varias estructuras inteligentes conectadas, como puede ser un parque de aerogeneradores eólicos.
- Post-proceso: durante el postproceso se llevará a cabo la actualización del modelo estructural o Digital Twin desarrollado en el preproceso, ya que es ahora cuando se empiezan a obtener datos de la instalación de monitorización por lo tanto es posible corregir y optimizar el modelo realizado al principio. Mediante la diagnosis de estos datos y a través de las capacidades de simulación que ofrece el Digital Twin será posible realizar predicciones sobre la respuesta de la estructura a su uso y al paso del tiempo, lo que será sumamente útil para la última fase del proceso.
- Resultados: una vez realizado el análisis de los datos y valores obtenidos, es posible llevar a cabo una planificación del mantenimiento de la estructura inteligente en cuestión, con el objetivo de si es posible adelantarse a que el fallo ocurra en cualquiera de sus componentes principales, de forma que aumente su seguridad y se optimice al máximo su funcionamiento, garantizando de esta forma que su salud estructural sea la más adecuada. Además, una vez que el comportamiento de la estructura es conocido a través de los datos obtenidos de la sensorización, es de suma importancia disponer de un sistema de alarmas, de forma que este avise cuando el sistema de monitorización detecta valores por encima de unos límites fijados como máximos y que, si son sobrepasados, los componentes de la estructura podrían sufrir daños irreversibles. De esta forma, si el sistema de alarmas avisa con suficiente

antelación, es posible que la estructura únicamente requiera reparaciones de menor gravedad y coste.

A continuación, se muestra cuál es el proceso de monitorización y gestión general de cualquier tipo de estructura inteligente (Ilustración 4).



Ilustración 4. Proceso de gestión y control de una estructura inteligente.

2.2. TICs y soluciones tecnológicas.

El uso inteligente de las TICs en el mundo hiperconectado actual en el que vivimos ofrece oportunidades infinitas. La adopción de estas tecnologías por las empresas, la industria y la sociedad en general contribuye a su modernización para ser mejores proveedoras y generadoras de valor añadido. La apertura de nuevos procesos, servicios y paquetes de datos facilita la colaboración, el compromiso y la participación social, fomentando la reutilización de soluciones existentes, la co-creación de servicios y la toma de decisiones de forma óptima y transparente.

2.2.1. IoT.

La *Internet of Things* (internet de las cosas en castellano), es una red en rápida expansión que está formada por dispositivos con sensores y programas informáticos integrados, que se conectan entre sí y comparten datos. De esta forma, es posible que miles de millones de dispositivos y objetos equipados con sensores se conecten entre sí, recopilen información en tiempo real y envíen estos datos, a través de una comunicación inalámbrica, a sistemas de control centralizados, como se puede observar en la Ilustración 6 de una forma esquemática [23]. Estos, a su vez, reducen el consumo de energía, gestionan el tráfico y mejoran diversas operaciones y servicios urbanos [24].



Ilustración 5. Elementos de IoT [23].

2.2.2. IA (Redes neuronales y control inteligente).

La inteligencia artificial (IA) hace posible que las máquinas aprendan de la experiencia, realicen tareas como si fueran seres humanos y se ajusten a nuevas aportaciones y parámetros. La mayor parte de los ejemplos de inteligencia artificial existentes hoy en día recurren en su mayoría al procesamiento del lenguaje natural y al aprendizaje profundo. Mediante estas tecnologías, las computadoras pueden ser entrenadas para desempeñar tareas específicas procesando grandes volúmenes de datos y reconociendo patrones de datos [25].

Los principales conceptos que aportan valor a la inteligencia artificial son:

- Automatiza el aprendizaje y el descubrimiento repetitivo a través de datos.

- Agrega inteligencia a productos existentes.
- Se adapta mediante algoritmos de aprendizaje progresivo
- Es capaz de analizar más datos y datos más profundos empleando redes neuronales con muchas capas ocultas.
- Logra una capacidad de precisión muy elevada.
- Mayor aprovechamiento de los datos.

Por otra parte, entre las principales técnicas utilizadas en inteligencia artificial destacan:

- Lógica borrosa.
- Sistemas expertos.
- Algoritmos genéticos.
- Redes neuronales.

A modo de ejemplo y en relación con el objetivo de estudio de este trabajo, en la referencia [26], se presenta un modelo de toma de decisiones de mantenimiento de aerogeneradores donde se aplica el monitoreo de la condición a componentes rotativos de turbinas de eje horizontal, con el objetivo de reducir la incidencia de fallos inesperados. Las predicciones de los porcentajes de vida requeridas por el modelo ofrecido, se obtienen mediante redes neuronales artificiales, de forma que las entradas utilizadas son variables de condición representativas para cada componente en estudio (rotor, multiplicadora, rodamiento principal y generador eléctrico).

2.2.3. *BigData*.

El término *BigData* se refiere a conjuntos de datos o combinaciones de conjuntos de datos cuyo tamaño, variabilidad y velocidad de crecimiento hacen sumamente difícil su captura, gestión, análisis o procesamiento mediante tecnologías y herramientas convencionales, como pueden ser bases de datos y estadísticas convencionales o paquetes de visualización, dentro del tiempo necesario para que puedan ser útiles [27].

La naturaleza compleja del *BigData* se debe en gran medida a que la mayoría de los datos generados por las tecnologías modernas son no estructurados, como pueden ser teléfonos inteligentes, los sensores incorporados en dispositivos, los vehículos... En la mayoría de los casos, a fin de utilizar el *BigData* de una forma eficaz, debe combinarse con datos estructurados.

El motivo por el cual el *BigData* hace que sea tan útil para muchas empresas y organizaciones es que les proporciona respuestas a muchas preguntas que ni siquiera sabían que tenían, proporcionándoles un punto de referencia. Teniendo una cantidad tan grande de información, los datos pueden ser probados y moldeados en función de la necesidad de la empresa, consiguiendo de esta forma identificar los problemas más rápida y eficazmente, reducir costes, así como identificar nuevas oportunidades de negocio.

2.2.4. *SmartGrid*/ Redes inteligentes de distribución eléctrica.

Se trata de redes energéticas que permiten controlar y monitorizar automáticamente los flujos eléctricos en una red y ajustar de la manera más óptima la oferta y la

demanda energética. Mediante su acoplamiento con sistemas compuestos por *smart meters* o contadores inteligentes, suministran información de consumo en tiempo real. Estas redes pueden igualmente contribuir a la integración de la energía renovable, a través de la combinación de información de la demanda energética con previsiones meteorológicas que permitan planificar de manera óptima la integración de la energía renovable en la red. A su vez, permite la posibilidad de que consumidores con capacidad de autoabastecimiento energético puedan utilizar su propia energía como respuesta a los precios existentes y vender su exceso de electricidad a la red [7].

2.2.5. 5G.

Mientras que las redes 3G y 4G utilizadas hoy en día por los teléfonos móviles plantean una serie de problemas a la hora de dar soporte a los diversos servicios necesarios para las aplicaciones de ciudades inteligentes y sostenibles, el desarrollo de la tecnología 5G, es decir, la quinta generación de tecnologías móviles, tiene el potencial de conectar de forma fiable los dispositivos a Internet y a otros dispositivos, transportar los datos mucho más rápidamente y procesar un gran volumen de datos con un mínimo retardo [24].

2.2.6. Digital Twin.

Un *Digital Twin* es una réplica digital exacta de un servicio, producto o proceso. El concepto es someter dicho servicio o producto a diversas condiciones de estrés de forma que se vean testadas sus debilidades más importantes sin la necesidad de construir costosos prototipos, cuya mejora subsecuente supone un elevadísimo coste para las empresas.

El concepto de *Digital Twin* se originó en la NASA, debido a la necesidad de enfrentarse al reto de crear sistemas y mecanismos que tienen la necesidad de ser monitorizados, manipulados e incluso reparados de forma remota y en un ambiente en el que se dispone de pocos datos de referencia. Solo cuando el prototipo virtual se ha iterado tantas veces de forma que su funcionamiento cumple con todos los requerimientos, es cuando se lleva a cabo la construcción de la versión física del producto. El producto a su vez se integra con sensores capaces de captar datos del exterior y enviar actualizaciones sobre el estado de las condiciones externas y los materiales de manera remota.

La clave del éxito actual de estos gemelos digitales es el desarrollo del *Internet of things*, permitiendo la conexión del mundo online y el offline. Esta tecnología dispone de múltiples usos, ya que permite ser empleada para monitorizar, actuar y recoger datos de funcionamiento normal, pero a su vez, también permite ir un poco más lejos ya que al combinarse con la Inteligencia Artificial es capaz de realizar de manera autónoma procesos de optimización y razonamientos que permitan obtener *insights* para detectar nuevas oportunidades de crecimiento y desarrollo [28].



Ilustración 6. Digital Twin de un aerogenerador [29].

2.2.7. Sensor.

Es un dispositivo diseñado para transmitir y recoger información de distintas magnitudes, ya sean físicas o químicas, a través de su transformación en variables eléctricas o también por colores. Es capaz de medir tanto la temperatura como la intensidad lumínica, la aceleración, el desplazamiento, la distancia, la inclinación, la fuerza, la presión, la torsión, el movimiento o la humedad, entre otros. La información generada por los sensores es transmitida a través de TICs hasta los sistemas encargados de su recepción e interpretarla para controlar y gestionar de una forma más óptima los sistemas en los que están instalados.

2.2.8. Machine learning.

El *Machine Learning* es una disciplina del campo de la IA que, mediante algoritmos, dota a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en volúmenes de datos masivos con el objetivo de hacer predicciones. Mediante este aprendizaje los ordenadores adquieren la capacidad de realizar tareas específicas de forma autónoma, es decir, sin tener la necesidad de ser programados para ello [30].

Pese a que el término se utilizó por primera vez en 1959, no ha sido hasta hace unos años cuando ha tomado relevancia debido al aumento de la capacidad de computación y el *boom* de los datos, convirtiéndose a su vez en una parte fundamental del *BigData*.

Los principales beneficios que aporta el *Machine Learning* en el ámbito empresarial son:

- Impulsa la innovación.
- Predice tendencias.
- Reduce costes.
- Acelera la detección y mejora la habilidad de reconocer anomalías.

2.2.9. SCADA.

Los sistemas SCADA, conocidos así por sus siglas en inglés de *Supervisory Control And Data Acquisition*, lo que traducido al español es Control Supervisor y Adquisición de Datos, permiten la gestión y el control de cualquier sistema local o remoto gracias a una interfaz gráfica capaz de comunicar al usuario con el sistema [31].

Se trata de una aplicación o conjunto de aplicaciones de software específicamente desarrolladas para funcionar sobre ordenadores de control de producción de todo tipo, con acceso a la planta mediante la comunicación digital con actuadores e instrumentos, e interfaz gráfica de alto nivel para el operador.

Inicialmente SCADA solo era un programa que permitía la supervisión y adquisición de datos en procesos de control, aunque en los últimos años esto ha cambiado, ya que han surgido una serie de componentes hardware y buses especialmente diseñados y adaptados a este sistema. Además, la interconexión de los sistemas SCADA también es propia, realizándose mediante una interfaz de la planta o sistema de producción centralizado al PC, cerrando el lazo sobre el ordenador principal de control.

El sistema SCADA permite la comunicación con los dispositivos de campo para controlar el proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador de control, la cual puede ser configurada por el usuario. Además, suministra a diversos usuarios de toda la información que se genera durante el proceso.

Los sistemas SCADA son utilizados en diversos campos, como las redes de distribución de gas natural y generación energética, el control de oleoductos, sistemas de transmisión de energía eléctrica y en yacimientos de petróleo y gas, a parte de otros.

2.3. Monitorización de la salud estructural / Structural Health monitoring.

En este apartado, se pretende abordar la monitorización de la salud estructural desde un punto de vista general en la ingeniería, es decir considerando la monitorización para múltiples campos de la ingeniería, además de tener en consideración tanto la monitorización de estructuras como de los distintas partes, piezas o componentes que la forman. Por tanto, en párrafos sucesivos la palabra estructura englobará todas sus partes sea del tipo que sea la estructura.

La monitorización de la salud estructural, en inglés *Structural Health Monitoring* es un proceso sumamente extendido en la ingeniería para evaluar el estado de las estructuras y sus componentes y comprobar si sufren algún daño crítico. La correcta ubicación de los sensores y dispositivos de medición resulta crucial para garantizar que la monitorización aporte una información modal realista y lo más precisa posible de la estructura que se está analizando. Los sistemas de monitorización estructural ofrecen información del estado de la estructura en tiempo real, de forma que permite a las personas responsable de dicha estructura reducir costes realizando un pronóstico del estado de la estructura y, por lo tanto, realizar un mantenimiento preventivo de ella. Estas ventajas que ofrecen estos sistemas hacen que se encuentren en continua investigación e innovación, con el objetivo de mejorar su rendimiento y obtener mediciones más precisas.

Existe una creciente preocupación por el impacto socio-económico que produce el deterioro de las estructuras debido al desgaste y el envejecimiento producido por eventos extremos y agentes meteorológicos, lo que ha originado que la monitorización de la salud estructural se haya convertido en una herramienta sumamente importante, por no decir imprescindible en el campo de la ingeniería. Mediante esta herramienta, es posible evaluar las propiedades estáticas y dinámicas de las estructuras para determinar su estado y el grado de seguridad que presenta a lo largo de su vida útil, así como localizar y determinar los daños que han sufrido y llevar a cabo una predicción del tiempo que la estructura podrá seguir prestando el servicio para el que estaba destinada. Todo esto, no sería posible sin realizar un seguimiento continuo de la estructura, lo cual a día de hoy se realiza mediante una red de sensores de distintas características y aplicaciones instalada en la estructura.

Es posible clasificar el proceso de monitorización de la salud estructural en cuatro niveles [32]:

- Nivel 1: evaluación operacional del sistema.
- Nivel 2: adquisición, normalización y depuración de datos.
- Nivel 3: extracción de características, síntesis y análisis de la información recogida.
- Nivel 4: desarrollo de modelo matemático y estadístico.

Es posible alcanzar el nivel dos del proceso únicamente usando técnicas que identifiquen modos de vibración o cambios en las frecuencias naturales. Mientras que para alcanzar el nivel tres resulta necesario un modelo estructural que compare y cuantifique el daño de la estructura en cuestión en relación con su estado inicial sin

daños. Por último, para llevar a cabo el nivel 4 son necesarias técnicas más sofisticadas y complejas sobre fatiga mecánica, entre otras.

Por otra parte, los cambios o alteraciones producidos como respuesta de la estructura a factores ambientales tales como la temperatura o la humedad pueden ser mínimos y, por tanto, ser considerados como ruidos en la señal captada por los sensores y el sistema de análisis de datos, y únicamente en el caso de que la modificación de la señal sea suficientemente mayor que el ruido de esta, la medida podrá ser considerada un daño en la estructura.

2.3.1. Técnicas utilizadas en monitorización de estructuras y componentes.

A continuación, se muestran algunas de las técnicas más destacadas en el actual desarrollo de la monitorización de la salud estructural. Su clasificación será atendiendo a la función que desempeñan en el proceso de monitorización.

2.3.1.1. Métodos para la extracción de los datos.

- Fibra óptica: la tecnología de fibra óptica destaca principalmente en aplicaciones de reducido tamaño y peso. Esta tecnología presenta la capacidad de combinar dos o más señales y transmitir las a través de un solo medio de transmisión, lo que se traduce en una notable reducción del cableado en relación con otros sistemas convencionales de carga y deformación. Como principal limitación, presenta una baja resistencia frente a esfuerzos cortantes y a la dobladura, lo que conlleva que la probabilidad de rotura de la fibra en el proceso de instalación o durante la manipulación de los elementos sea elevada, por lo que su manipulación debe ser muy cuidadosa, principalmente cuando las fibras sean de gran longitud.

Dentro de la tecnología de fibra óptica, resultan de gran interés las redes de Bragg (FBG) (Ilustración 7), las cuales logran alcanzar el último nivel del proceso de monitorización combinando una red de sensores repartidos sobre la estructura en estudio y un sistema de captación de datos de la propia estructura en tiempo real.

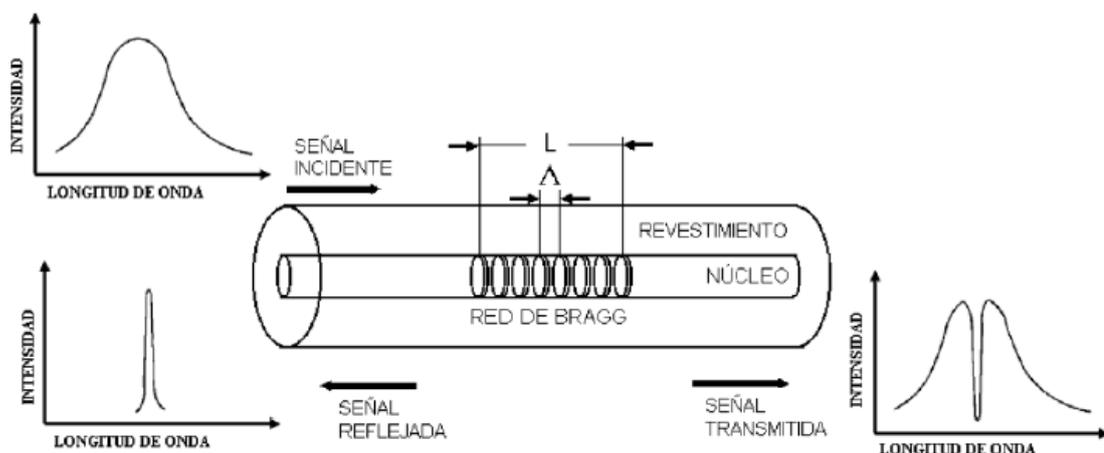


Ilustración 7. Funcionamiento de una red de Bragg de fibra óptica [33].

Los sensores FBG están formados por una especie de rejilla, conocido como marcado de Bragg, el cual está situado en el interior de las líneas de fibra

óptica, comportándose de una forma similar a un filtro. Mediante la exposición de la FBG de la fibra óptica a un haz de luz de banda ancha, se refleja una determinada banda con una pequeña longitud de onda de luz y permite pasar el resto de la fuente de luz. De esta forma, el cambio de la banda de longitud de onda de luz reflejada por el sensor FBG permite determinar el estado de deformación que presenta la estructura. Además de esto, una misma línea de fibra óptica es capaz de albergar al menos 24 sensores, lo que permite reducir significativamente la cantidad de cableado utilizado en la monitorización de la estructura [34].

- **Acelerómetros:** se trata de dispositivos sumamente extendidos en la monitorización estructural, los cuales basan su funcionamiento en la medición de la aceleración del elemento al que va unido respecto de una masa inercial interna. Existen distintos tipos de acelerómetros, siendo sus parámetros más destacados y los cuales determinan su aplicación, el rango de funcionamiento en frecuencia y temperatura, el precio, la resistencia del dispositivo y el tamaño. De esta forma, las características de cada tipo de acelerómetro hacen que se destinen para distintas aplicaciones en función de sus condiciones. Algunos de principales tipos de acelerómetros son los piezoeléctricos, piezoresistivos, mecánicos, capacitivos y los térmicos [35].

Los acelerómetros piezoeléctricos (Ilustración 8) basan su funcionamiento en el fenómeno de la piezoelectricidad y las propiedades de los cristales piezoeléctricos, los cuales a partir de su variación estructural producen corriente eléctrica. Este tipo de acelerómetros están formados por una masa inercial y un cristal piezoeléctrico situado entre la carcasa y la masa, de forma que cuando se produce una deformación física del cristal que va inmerso en el acelerómetro, se produce una corriente, a partir de la cual se puede calcular la aceleración.

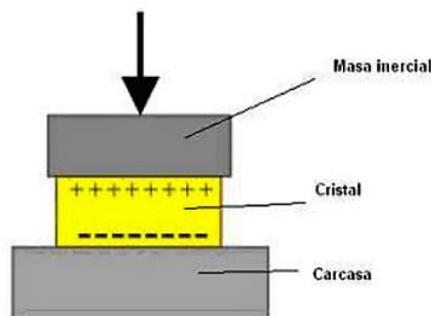


Ilustración 8. Acelerómetro piezoeléctrico [36].

Un acelerómetro piezoresistivo (Ilustración 9) difiere de uno piezoeléctrico en que utiliza un sustrato en vez de un cristal piezoeléctrico. Dicho sustrato suele ser de materiales como el silicio o el zafiro. La fuerza que imprime la masa inercial sobre el sustrato varía su resistencia, por lo que mediante un puente de Whetstone se mide la intensidad de corriente. Además, este tipo de tecnología es capaz de medir aceleraciones hasta valores nulos de frecuencia en Hz.

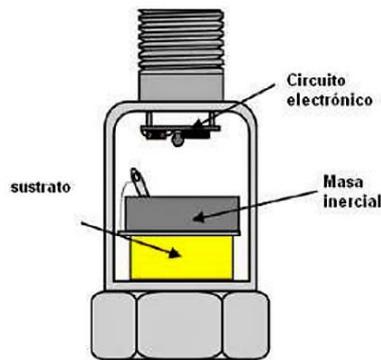


Ilustración 9. Acelerómetro piezoresistivo [36].

Por otra parte, los acelerómetros mecánicos (Ilustración 10) basan su funcionamiento en el uso de galgas extensiométricas, las cuales unen la carcasa del instrumento con la masa inercial interna. De esta forma, cuando se produce una aceleración en el elemento al que está adherido el acelerómetro, las galgas extensiométricas sufren una deformación proporcional a dicha aceleración, produciéndose una variación en la corriente. Además, disponen de un sistema de amortiguación para evitar la oscilación propia del instrumento y no alterar la medición.

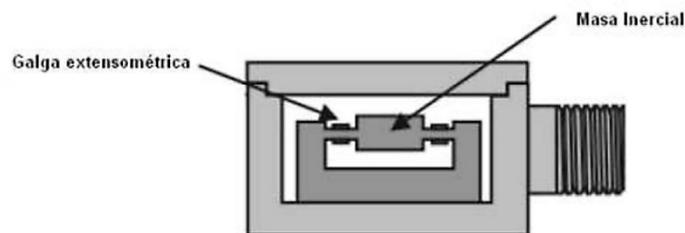


Ilustración 10. Acelerómetro mecánico [36].

Los acelerómetros térmicos (Ilustración 11) basan su funcionamiento en la convección termal. Están formados por un sustrato de silicio con un hueco en su mitad, donde va alojada la resistencia de silicio o calentador suspendida en el centro de la zanja *Ilustración 11*. En los extremos del calentador van adheridos dos termopares simétricos respecto al mismo, siendo metales diferentes que producen un voltaje en función de la diferencia de temperatura. De esta forma, por encima de los termopares se produce una pequeña cavidad de aire caliente con aspecto de burbuja, la cual está cerrada herméticamente, siendo el único elemento móvil de la estructura del acelerómetro. Por tanto, cuando se ejerce una fuerza externa sobre el sensor, la burbuja se mueve produciéndose una variación de las condiciones térmicas de los termopares, de forma que a su vez se produce un voltaje que es captado como una señal de salida, en función de la cual se calculan las aceleraciones.

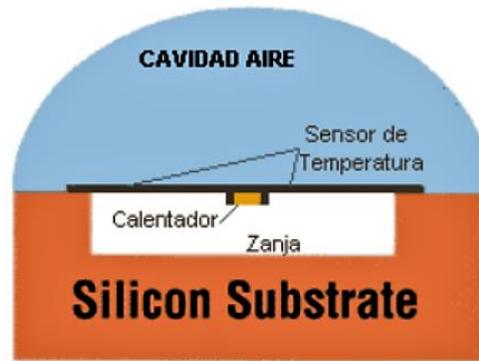


Ilustración 11. Acelerómetro térmico [36].

Por último, en los acelerómetros capacitivos (Ilustración 12) la masa inercial está sujeta a unos resortes que permiten que se mueva libremente. A su vez, la masa inercial tiene adherida una serie de filamentos paralelos que actúan como placas de condensador frente a placas fijas ancladas al sustrato. De esta forma, las aceleraciones ejercen una fuerza sobre la masa, la cual se mueve y desplaza con ella los filamentos, provocando un cambio de capacidad en el acelerómetro que es detectado y procesado como una salida de voltaje, lo que permite calcular las aceleraciones producidas.

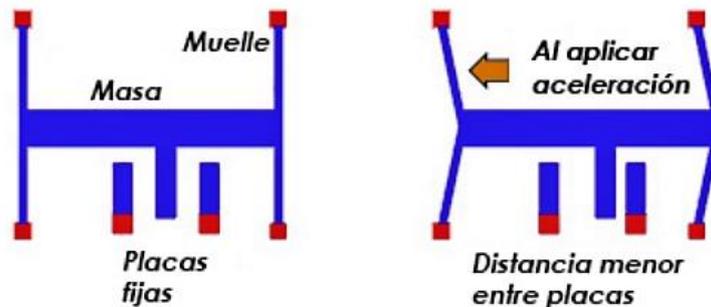


Ilustración 12. Acelerómetro capacitivo [36].

2.3.1.2. Métodos de procesamiento de datos.

A continuación, se presentan brevemente algunos de los métodos más utilizados para el procesamiento de datos.

- Transformada de Hilbert-Huang: se trata de un método orientado al análisis de estructuras de comportamiento no lineales y no estacionario, resultando muy útil en el campo de la monitorización de la salud estructural mediante la estimación de parámetros y la detección del momento justo en el que se produce el daño. La transformada de Hilbert-Huang ha sido un método sumamente utilizado ya que posibilita estimar la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguación de varias señales.

Su método se basa en formar una función analítica a partir de cada respuesta modal, denominada función de modo intrínseco (IMF) de la señal medida, de forma que los valores que calcula la transformada para cada IMF se usan para

calcular los correspondientes coeficientes de amortiguamiento, frecuencias y modos de vibración relativos.

Por todo esto, es usual utilizar este método para identificar el instante preciso en el que ocurre el daño o bien cuando se producen cambios repentinos en una estructura en función de la señal grabada usando la primera IMF, la cual contiene la componente de mayor frecuencia de la señal.

- Transformada de Wavelet: es un método destinado para la estimación de parámetros modales, es decir, el amortiguamiento, la frecuencia natural y los modos de vibración incrementando la relación señal/ruido.

Cabe destacar, que una característica que diferencia a la Transformada de Wavelet de otros métodos de localización de daño en tiempo-frecuencia, es que permite ampliar la señal dividiéndola en diferentes bandas de frecuencia, de forma que la localización en el tiempo y la magnitud del daño pueden ser identificados por la presencia de patrones de picos o impulsos en la señal expresada en tiempo-frecuencia. Cuando se trata de altas frecuencias la Transformada de Wavelet utilizada anchos de banda de gran tamaño y una buena localización del tiempo, mientras que si se trata de pequeñas frecuencias el ancho de banda será pequeño junto con una localización del tiempo mejor. Todo esto permite aumentar la relación señal/ruido, consiguiendo tolerar un ruido de hasta un 20% de la señal. Además de esto, el daño producido debe ocurrir en el periodo de monitorización, lo que hace que este método solo sea adecuado si la monitorización de la estructura es continua.

- Descomposición empírica en modos (EMD): se trata de otra técnica utilizada para el procesamiento de datos en el análisis estructural, la cual permite analizar señales formadas por varias frecuencias y separar las distintas componentes de la frecuencia. Es un método complementario al visto anteriormente de la transformada de Hilbert, ya que igualmente sirve para estimar la frecuencia natural y el amortiguamiento para cada componente de la señal separada previamente por la EMD. Por tanto, la EMD extrae la respuesta modal conocida como función de modo intrínseco (IMF) de la señal medida mediante un proceso de filtrado, mientras que la transformada de Hilbert desarrolla una función analítica a partir de cada IMF.

Existen numerosas similitudes en el cálculo de los parámetros modales realizado por ambos métodos y el anteriormente descrito de la transformada de Wavelet, de forma que el proceso de cálculo analíticos para calcular las frecuencias modales, los coeficientes amortiguamiento y los modos son iguales para los tres métodos de procesamiento de señales. No obstante, la respuesta modal obtenida es sensible y dependiente del método utilizado para el filtrado de la señal.

Sin entrar más en profundidad en los métodos de procesamiento de datos, poniendo atención a los párrafos anteriores lo que subyace es que resulta necesario realizar operaciones matemáticas complejas con las señales registradas por los sensores, todo esto a través de un potente software programados en función del método utilizado.

2.3.1.3. Testeo experimental y técnicas no destructivas.

Mediante este tipo de técnicas es posible analizar y evaluar las propiedades físicas y la integridad estructural tanto de estructuras como de los materiales de los que estén construidas, de manera que no afecten ni a la condición ni a la funcionalidad de los mismos. La creciente utilización de técnicas no destructivas en el análisis estructural es debido a la elevada cantidad de fallos y al coste adicional que supone la utilización de técnicas destructivas tradicionales en diversos campos de la ingeniería. Por tanto, las técnicas no destructivas suponen el camino a seguir en la actualidad, ya que disponen de diversas funciones, como la determinación de propiedades mecánicas, la localización, detección y caracterización de discontinuidades, medida de deformaciones, entre otras. Algunas de las técnicas no destructivas más empleadas en la monitorización estructural son:

- Termografía: esta técnica se basa en el principio de que las anomalías subsuperficiales afectan y alteran el flujo de calor a través del material de la estructura y que los cambios en dicho flujo de calor causan variaciones situadas en la superficie de la temperatura, de forma que estas pueden ser detectadas por los sistemas de radiación infrarroja (termógrafos). La transferencia de calor producida depende de algunas propiedades del material, tales como la densidad, la conductividad térmica, la temperatura o la emisividad (Ilustración 13). Esta última propiedad, la emisividad (ϵ) es una de las más importantes, ya que muestra la capacidad de la superficie del material para emitir energía por radiación, dependiendo de ciertos parámetros como el color o la rugosidad de la superficie. Su valor varía entre 0 y 1, siendo el valor unitario ($\epsilon=1$) para una superficie perfectamente negra e ideal.

Al conocer la temperatura a la que se encuentra una estructura, un producto o una máquina es posible identificar si se está produciendo algún tipo de anomalía, ya que un aumento repentino de la temperatura puede estar indicando algún tipo de pérdida de aislamiento, fuga, sobretensiones o sobrecalentamientos [37].

Dentro de las principales ventajas de la termografía con infrarrojos, destacan su carácter no invasivo, sensibilidad a las cavidades y huecos, a la humedad y a las fugas, su aplicación rápida y de forma remota. En cambio, algunas de sus limitaciones son que la profundidad y el tamaño del defecto no pueden analizarse simultáneamente y que la profundidad máxima de detección del daño es menor de 0,5 metros.



Ilustración 13. Inspección termográfica de un aerogenerador eólico [38].

Hoy en día, la termografía digital posibilita una rápida captación y registro automático de la temperatura, lo que ofrece la posibilidad de realizar un control exhaustivo de las posibles variaciones de temperatura a lo largo del tiempo.

- Testeo mediante partículas magnéticas: se basa en la distorsión que sufren las líneas de los campos magnéticos debido a las discontinuidades del material. Esta distorsión atrae a las partículas de polvo ferromagnéticas haciendo visible los daños o grietas que tiene el material analizado. Este fenómeno es causado porque las discontinuidades presentes en un material magnetizado interrumpen el campo magnético que fluye por él mismo, de forma que se produce una inversión local en la polaridad.

El modo de operación de esta técnica consiste en aplicar una capa de partículas de acero cubiertas con un pigmento de color llamativo sobre el componente a estudiar, de esta forma las partículas son atraídas por los campos magnéticos locales de las fisuras o grietas, y por tanto permitiendo su detección visual en condiciones de iluminación adecuadas.

- Técnicas como las emisiones acústicas, *tap tests*, medidas ultrasónicas e *impact-echo tests* son también muy utilizadas para la evaluación de condiciones generales de componentes y estructuras. Además de la radiografía, radiometría, el testeo visual, el testeo con líquido penetrante o la fotoelasticidad.

2.3.2. Tipologías de monitorización.

Como ya se ha expuesto de una forma indirecta en apartados anteriores, la monitorización hace referencia al proceso mediante el cual se realizan tomas de datos y lecturas sobre el comportamiento de estructuras, maquinaria, objetos, componentes mecánicos y estructurales o procesos, con el objetivo de conocer, analizar y obtener conclusiones de mejora acerca de su estado.

Existen dos principales métodos en los que clasificar la monitorización, en función de la forma de enfocar su ejecución:

- Monitorización off-line.

Se trata de un método limitado a su implementación en sistemas, estructuras o maquinaria que no tenga un carácter crítico, es decir que no disponga de sistemas de monitorización de toma de datos continua o estacionarios. Por tanto, su uso se basa en la inspección puntual, realizando mediciones a través de sensores y equipos de captación móviles o no estacionarios. Estos equipos son de composición y capacidades variables, con un peso y volumen reducido para facilitar su traslado, aunque son capaces de ofrecer prestaciones muy parecidas a las de los equipos fijos o de medición continua.

Algunos de los sensores más empleados en la monitorización off-line son de temperatura, acústicos y de vibraciones.

Cabe destacar, que este tipo de soluciones de carácter puntual no son las que se tendrán en consideración para el caso de estudio de este trabajo, ya que un aerogenerador eólico requiere de una monitorización continua y exhaustiva,

debido a que está formado por diversos componentes críticos y de elevado coste, resultando necesaria su monitorización on-line, la cual se presenta a continuación.

- Monitorización on-line.

Este método de monitorización proporciona un mayor valor añadido, ya que permite obtener mediciones de forma continua y a una frecuencia predeterminada, siendo dicha frecuencia de muestreo adaptada en función de las variables que desean monitorizar.

De esta forma, la monitorización on-line proporciona lecturas de estado y funcionamiento de forma continua y en tiempo real, resultando destacable el carácter síncrono de cara a lograr establecer relaciones de causalidad y correlaciones entre los fenómenos producidos.

A su vez, es importante tener en cuenta que, si se realizan mediciones con diferentes tipos de sensores en instantes de tiempo diferentes, no será posible establecer relación entre fenómenos. De esta forma, mediante el muestreo de fenómenos vibratorios será posible conseguir soluciones más sofisticadas, siendo muy común encontrar soluciones en el mercado de módulos destinados a realizar la sincronización entre los distintos componentes.

2.4. Mantenimiento en la ingeniería.

Hoy en día, el mantenimiento al igual que otros sectores y ramas de la ingeniería, como se expuso en el apartado 2.1.2. *Revoluciones industriales y contexto actual en la UE*, afronta una nueva generación dentro del marco de la Industria 4.0., con la utilización de equipos electrónicos de inspección y control, muy fiables, capaces de conocer el estado real de los equipos a través de mediciones continuas o periódicas de numerosos parámetros como los ruidos, las vibraciones, las temperaturas, realizadas mediante técnicas como los ultrasonidos, la termografía o los análisis físico-químicos. Además, la aplicación al mantenimiento de TICs gestionadas por ordenadores, permiten la acumulación de experiencia empírica y el desarrollo de sistemas de tratamiento de datos, lo que permitirá en muy poco tiempo implementar sistemas expertos e inteligencia artificial en el proceso de mantenimiento, aumentando significativamente su capacidad de diagnóstico y anticipación.

Es posible definir el mantenimiento como el control constante de las instalaciones (si se trata de una planta) o de los componentes (si es el caso de un producto o máquina), el conjunto de trabajos de reparación y revisión fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento y estado de conservación en condiciones óptimas de productividad y seguridad.

Dichas tareas de mantenimiento son de aplicación tanto en instalaciones fijas como móviles, en edificios industriales, comerciales o de servicios específicos y en estructuras en general, equipos y maquinarias o cualquier otro tipo de sistema productivo. A su vez, el mantenimiento no se tiene que limitar únicamente a hacer intervenciones de conservación, sino que además tiene que participar activamente en la mejora continua de dichos procesos productivos, teniendo siempre presente la evolución tecnológica del momento.

Como objetivos específicos de la realización de un correcto plan de mantenimiento se pueden destacar:

- Alcanzar o alargar la vida útil de los bienes y procesos productivos.
- Evitar las paradas de máquinas por avería.
- Conservar la maquinaria en condiciones óptimas de productividad y seguridad.
- Evitar anomalías causadas por un mantenimiento insuficiente y minimizar la gravedad de las averías producidas.
- Reducción de los costes de producción.
- Integrar los departamentos de mantenimiento, producción e I+D.
- Innovar, tecnificar y automatizar el proceso productivo.

Existen varios sistemas para desempeñar la tarea de mantenimiento de las instalaciones en operación. Algunos de ellos no centran únicamente su atención en tareas de corrección de fallos producidos, sino que además tratan de actuar previamente a la aparición de los mismos, actuando tanto sobre los bienes tal y como fueron diseñados, como sobre los que se encuentran en fase de diseño y desarrollo, incluyendo en estos últimos, los modos de simplicidad en el diseño, análisis de su mantenimiento, diseño sin mantenimiento, etc.

2.4.1. Mantenimiento correctivo.

Se trata del conjunto de actividades de sustitución y reparación de elementos deteriorados por repuestos, el cual se realiza únicamente cuando ocurre el fallo [39].

El mantenimiento correctivo se aplica en sistemas complejos y en equipos con cierta antigüedad, generalmente en componentes electrónicos, mecánicos o en los que resulta imposible predecir los fallos, además de en procesos que admiten interrupciones sin importar el momento y durante el periodo que sea, sin afectar la seguridad.

Como inconveniente, es posible destacar que el fallo en el equipo puede ocurrir en cualquier momento, resultando fatal en momentos de mayor exigencia del sistema. Además, ciertos fallos no detectados a tiempo, originados en componentes cuya sustitución no hubiera resultado de elevado coste, pueden causar daños mayores en otros elementos o piezas conexos que se encontraban en buen estado de uso y conservación.

Otros inconvenientes del mantenimiento correctivo son que, para minimizar el impacto de la avería, el tiempo de respuesta debe ser el más reducido posible, siendo necesario contar con alta disponibilidad de mano de obra cualificada, además de disponer de un inventario de repuestos suficiente en todo momento. Dichos inconvenientes condicionan en muchos casos la viabilidad económica de los sistemas productivos, principalmente si ocurren en picos de operación.

Por todo esto, es posible encontrar justificación para descartar esta estrategia de mantenimiento en componentes críticos y de elevado coste de los equipos y sistemas.

2.4.2. Mantenimiento preventivo.

Se trata de una estrategia de mantenimiento de equipos basada en la realización de revisiones periódicas. De esta forma, no resulta necesario esperar a que se produzca la rotura o fallo del componente, sino que se opta por la prevención mediante la planificación de inspecciones previas y de carácter regular en el tiempo. Será conveniente desarrollar planes de mantenimiento adecuados en función de las necesidades y recurso del proyecto, además de tener en consideración las especificaciones del fabricante del equipo [39].

Con el objetivo de minimizar al máximo las averías y fallos en los equipos, las inspecciones realizadas deberán ser en profundidad, por lo que en muchas ocasiones será necesario desmontar el equipo al completo para poder analizar el estado de los diversos componentes con la mayor claridad posible. Esto hace indispensable realizar una correcta planificación en el tiempo para optimizar, es decir minimizar al máximo el número de operaciones de mantenimiento durante la vida útil del equipo.

Por tanto, la planificación para la ejecución de este sistema de mantenimiento consiste en:

- Definir qué componentes o elementos serán objeto de este sistema de mantenimiento.
- Establecer la vida útil de dichos componentes o elementos.
- Determinar los trabajos que se van a realizar en cada caso.

- Agrupar y organizar los trabajos de ejecución del mantenimiento en función del momento en el que es más adecuado realizar las intervenciones, teniendo en cuenta la carga de trabajo del equipo y otros parámetros.

Por todo esto, cabe destacar como aspectos ventajosos de la implementación de este tipo de mantenimiento:

- La correcta planificación de las operaciones preventivas de mantenimiento, conllevará un impacto reducido en la producción y operación de los equipos.
- Es posible considerar que la calidad de los trabajos se incrementaría respecto al mantenimiento correctivo, ya que no en los trabajos preventivos, al estar planificados no existe una presión tan elevada por poner en funcionamiento el sistema de nuevo.
- La planificación de inventario es posible planificarla y ajustarla más fácilmente a las necesidades reales, lo que repercutirá en los costes derivados del mantenimiento.

Respecto a las desventajas del mantenimiento preventivo están:

- La incorrecta definición de los planes de mantenimiento preventivo, pueden ocasionar un considerable incremento de los costes. Esto es debido a la incorrecta gestión de los recursos, derivado de su asignación en exceso (más paradas y más sustituciones de componentes) o por su asignación por defecto (menos paradas de las necesarias requerirá de actuaciones correctivas).
- Imposibilidad de hacer desaparecer por completo la aparición de fallos y averías inesperadas.

2.4.3. Mantenimiento predictivo.

Se trata de una técnica de mantenimiento que se basa en el seguimiento y diagnóstico continuo, a través de la monitorización del sistema, permitiendo realizar intervenciones correctivas inmediatas a consecuencia de la detección de algún síntoma de rotura o fallo [39].

De esta forma, se fundamenta en el hecho de que gran parte de los fallos en los equipos se producen lentamente y en algunos casos, previamente al fallo es posible tener indicios evidentes sobre un futuro fallo. Ya sea a simple vista o mediante la monitorización de ciertos parámetros como la temperatura, la presión, la vibración, los ruidos, la resistencia eléctrica, la viscosidad, el contenido de impurezas, de humedad y de cenizas en el aceite, el espesor de chapas o el nivel de ciertos fluidos. De esta forma, el método predictivo siempre va orientado a la anticipación en la ocurrencia del fallo a través del seguimiento de la evolución de futuros fallos.

Cabe destacar el elevado grado de complejidad que supone la ejecución de esta estrategia de mantenimiento, el cual viene determinado por la necesidad de un correcto mapeado digital de los diferentes componentes y elementos que forman el equipo y de las variables a monitorizar. Por tanto, es fundamental realizar los pasos anteriores mediante las herramientas adecuadas, evitando la posibilidad de que una anomalía sumamente perjudicial para el equipo se pase por alto.

Como principales ventajas del mantenimiento predictivo se encuentran:

- A causa de la definición y extrapolación del periodo temporal en el que el elemento puede entrar en régimen de fallo, es posible realizar una planificación de los niveles de inventario de los repuestos y de la producción, optimizando de esta forma los recursos monetarios existentes.
- Los tiempos de paro del sistema tenderán a reducirse en comparación con las técnicas de mantenimiento correctivo y preventivo ya que, será posible tener conocimiento del foco del fallo previamente a la parada.
- Derivado de la monitorización continua de los equipos, será posible conocer en todo momento su estado y su comportamiento ante diferentes condiciones de trabajo.

Respecto a ciertas desventajas que puede presentar el mantenimiento predictivo destacan:

- Como se dijo unas líneas antes, es posible que en determinadas ocasiones no se pueda identificar adecuadamente los componentes o elementos más críticos del equipo que deben ser monitorizados.
- La implantación de la estrategia predictiva requiere una inversión económica inicial de mayor cuantía en comparación con las otras opciones de mantenimiento. Aunque la amortización de su implementación se ve más que justificada para algunos sectores industriales, como puede ser el caso de los aerogeneradores eólicos, como se verá más adelante.

2.5. Monitorización de la condición / Condition monitoring.

Como paso previo al Capítulo 3, el cual tratará los conceptos básicos que caracterizan a un aerogenerador eólico, y, una vez introducidos los temas de monitorización de la salud estructural y las características de las técnicas de mantenimiento más destacadas en la industria a día de hoy, es importante tener en cuenta la estrategia de mantenimiento basada en la condición real de los equipos, conocida en inglés como *Condition Monitoring*, ya que se trata de una de las técnicas más efectivas utilizadas actualmente en el mantenimiento predictivo para garantizar la salud de los equipos y máquinas en cualquier proceso productivo. Por esto, resulta de gran interés su estudio, ya que en gran medida la monitorización de los aerogeneradores eólicos está fundamentada en dicha estrategia, por lo que en este apartado su análisis se abordará desde un punto de vista general, pero ligeramente orientado al campo de la energía eólica, ya que es una de las bases principales de la comparativa y el caso de estudio final de este trabajo.

El término *Condition Monitoring* hace referencia al Monitoreo de la condición en castellano. La estrategia del *Condition Monitoring* juega un papel fundamental para la realización de un procedimiento de mantenimiento eficiente, permitiendo la detección de problemas y fallos potenciales en una etapa temprana. La información obtenida, permite programar las tareas de mantenimiento o las reparaciones y sustituciones de componentes antes de que el problema sea mayor, además de mejorar la disponibilidad de la máquina y reducir a su vez los costes de mantenimiento. Además, ayuda a desplegar los equipos humanos de servicio de una manera más óptima, centralizando los esfuerzos donde realmente son necesarios [40].

Es posible asemejar la técnica del *Condition Monitoring* al mantenimiento predictivo visto anteriormente ya que ambas estrategias desempeñan un papel fundamental en el establecimiento de una estrategia de mantenimiento centrada en la condición y en la reparación, resultando ser en la mayoría de los casos más beneficioso que las técnicas correctivas y preventivas. Por tanto, un sistema de monitorización de la condición formado por algoritmos integrados de detección de fallos permite disponer de alertas tempranas de fallos o defectos mecánicos y eléctricos para prevenir averías de componentes mayores, además de reducir significativamente los efectos secundarios sufridos sobre otros componentes. Muchos de estos fallos pueden ser detectados mientras que el componente dañado está aun en funcionamiento [41].

Además, cabe destacar la posibilidad y la importancia de la implementación de sistemas de detección de fallos, conocidos en inglés como *Fault Detection Systems* (FDS), los cuales suponen grandes beneficios de cara a conseguir la mejora en la operatividad de los equipos debido a sus características de alerta temprana, ya que el mantenimiento basado en la condición se realiza a pesar de llevar a cabo mantenimientos de carácter correctivo y preventivo. Se sabe que es necesaria una fuerte inversión inicial para implementar y desarrollar el FDS, aunque por ejemplo en el sector eólico es contrarrestado con la producción continua de energía, aportando además algunos beneficios como evitar el deterioro prematuro de ciertos componentes, la mejora del factor de capacidad o la supervisión en lugares remotos.

Normalmente, se suele hacer referencia al *Condition Monitoring* como una metodología o estrategia, aunque a menudo se considera que, a su vez, está dividido en dos grandes ámbitos: *Trend Monitoring* y *Condition Checking*.

2.5.1. Trend monitoring.

Es posible traducir *Trend monitoring* al castellano como monitorización de tendencias, aunque en la industria es más bien conocido por su término en inglés.

Este método derivado del *Condition Monitoring* se basa, como su nombre indica, en monitorizar la tendencia de funcionamiento de la máquina o equipo en estudio, mediante el seguimiento de sus parámetros críticos, consiguiendo identificar determinados comportamientos que pueden estar conduciendo al fallo o rotura del mismo [42].

Esta técnica permitirá realizar un seguimiento exhaustivo del estado del equipo y dispondrá de la generación de avisos y alarmas con cierta antelación al fallo, aunque resulta de máxima importancia regular el nivel de avisos generados, ya que de lo contrario podría afectar a la disponibilidad de uso del equipo, componente o máquina. Por tanto, lo óptimo sería condicionar la aparición de estas alertas a rangos de valores cuya sensibilidad permita la realización de las tareas de operación y mantenimiento ajustadas a las capacidades de los equipos técnicos humanos, es decir, aquellos que en caso necesario sean los encargados de llevar a cabo la parada controlada del sistema y las tareas de mantenimiento.

A través de la Ilustración 14, es posible observar gráficamente los conceptos explicados en los párrafos anteriores, destacando los parámetros siguientes:

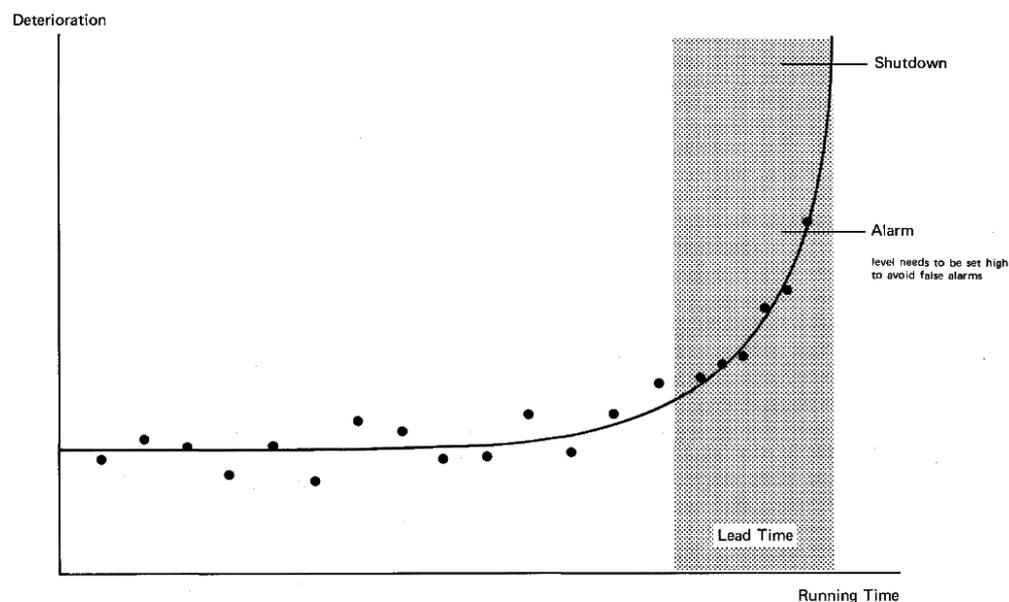


Ilustración 14. Gráfica del proceso de deterioro de un equipo o máquina en función del tiempo de operación [42].

- *Lead Time*: se trata del intervalo de tiempo en el que se dispone de ciertos indicadores del comportamiento del equipo que indican que el fallo está próximo.

- *Alarm*: instante en el cual podría saltar el aviso de fallo del equipo. Resulta indispensable el adecuado posicionamiento de los niveles de aviso para poder realizar un mantenimiento óptimo.
- *Shutdown*: instante en el que se produce el fallo del equipo.

2.5.2. Condition Checking.

Al igual que el concepto anterior, es posible traducir Condition Checking al inglés como Comprobación de Condiciones.

Su estrategia se basa en el profundo conocimiento del funcionamiento del equipo o máquina para así poder detectar alteraciones anormales de los parámetros de operación. A través de dicho conocimiento, conseguido gracias al análisis histórico de las condiciones de operación monitorizadas con anterioridad, será posible determinar si el funcionamiento del equipo en esas condiciones se ajusta al comportamiento del mismo previamente fijado en condiciones similares [42].

Aunque la estrategia de *Condition Checking* ofrece un análisis del equipo monitorizado, cabe destacar que presenta ciertas limitaciones importantes ya que se fundamenta en la existencia de una serie histórica fiable para así poder determinar el grado de desviación de las condiciones medidas en relación con el comportamiento ideal. Por tanto, no será posible determinar si dicha desviación existe en las condiciones de trabajo del inicio de la monitorización, no siendo así para la estrategia de *Trend Monitoring*.

No obstante, es posible aplicar esta estrategia para comprobaciones en equipos de nueva instalación, realizando la comparación con valores obtenidos en equipos instalados anteriormente y en operación como referencia. De esta forma, es posible cubrir la falta de serie histórica en la observación en los primeros momentos de operación del equipo.

Una vez expuesta la estrategia de *Condition Monitoring*, es posible destacar que su implementación conlleva numerosas ventajas y aspectos positivos al mantenimiento de equipos, maquinaria y sistemas industriales de carácter crítico en cualquier sistema productivo. Además, es posible notar su alineación a la estrategia de mantenimiento predictivo vista en apartados anteriores, en las cuales se fundamentará el análisis comparativo de este trabajo.

Cabe destacar, que la implementación de estas estrategias posibilita la anticipación a posibles roturas, colapsos y fallos en los equipos y maquinaria, basándose en el principio de la detección precoz de los síntomas que preceden a dichos fallos y permitiendo de esta forma planificar y realizar una mejor gestión de los recursos con los que los equipos de mantenimiento deban contar.

CAPÍTULO 3. AEROGENERADORES EÓLICOS. CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS PRINCIPALES.

3.1. Energía eólica.

La energía eólica es la energía que se obtiene del viento. Su origen se basa en que la radiación solar calienta la atmosfera de una forma diferencial, lo que provoca que la temperatura del aire varíe de unas zonas a otras. De esta forma, el aire caliente sube, provocando una reducción de la presión atmosférica en la superficie terrestre, y provocando que el aire frío descienda para sustituirlo. El fenómeno producido por el proceso natural anterior es el viento, el cual está formado por masas de aire que cuando están en movimiento provocan energía cinética por efecto de las corrientes, transformando estas en electricidad a través de un aerogenerador.

Toda la energía que proviene del viento no es aprovechable, la energía eólica solo puede aprovechar las corrientes horizontales comprendidas entre 3 y 25 m/s, ya que las corrientes verticales no disponen de la energía dinámica necesaria para su aprovechamiento.

La energía eólica es hoy en día la energía renovable más desarrollada y madura. Es una fuente de energía limpia e inagotable, capaz de reducir considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero, así como de preservar el medio ambiente.

Desde la antigüedad, la energía eólica ha sido utilizada para mover los barcos impulsados por velas o las aspas de los molinos conectados a maquinaria de distinta naturaleza. Desde principios del siglo XX es utilizada además para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. Como se verá en detalle más adelante, la energía cinética del viento mueve la hélice del aerogenerador, de forma que, mediante un sistema mecánico, hace girar el rotor de un generador encargado de producir la energía eléctrica. Con el objetivo de conseguir un mayor aprovechamiento de la energía y reducir su impacto ambiental, los aerogeneradores suelen encontrarse agrupados en parques eólicos.

En la Ilustración 15, se muestran algunas cifras de interés facilitadas por la Asociación Empresarial Eólica sobre la industria de la energía eólica a junio de 2021.

Pese a que el último año ha sido particular en todos los sentidos derivado de la pandemia de COVID-19, la energía eólica ha seguido avanzando, repitiendo como segunda tecnología del mix energético, con una cobertura del 21,9% de la demanda, muy cerca de alcanzar la primera posición. Actualmente, con un total de 27.446 MW, España es la quinta potencia mundial en el ranking de países con mayor potencia eólica instalada.

En 2020 se instalaron 1.720 MW eólicos, no obstante, aunque es un indicador positivo para el sector, aún es inferior a los 2,2 GW anuales que son necesarios instalar hasta el año 2030 para asegurar la consecución de objetivos marcados por el PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030).

Desde un punto de vista económico, la aportación de la energía eólica a la economía española ha supuesto el 0,35% del PIB, siendo esta muy relevante para el país.

Además, el sector eólico emplea en torno a 30.000 personas de forma directa. En España existen 237 centros industriales de fabricación en 16 de las 17 CCAA.

En cuanto a medio ambiente se refiere, la eólica evita anualmente 29 millones de toneladas de CO2.



Ilustración 15. Principales cifras del sector eólico en España, en Europa y en el mundo [43].

En cuanto a Europa, durante el año 2020 se instalaron 14,7 GW de nueva potencia, situando la potencia total instalada en 220 GW. España se encuentra el cuarto lugar del ranking de países por nueva potencia en 2020. La eólica offshore sigue su ascenso, con una potencia instalada de 25 GW.

A nivel mundial la energía eólica instalada creció un 53% durante 2020, hasta alcanzar los 743 GW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC), siendo 2020 el mejor año de la historia para la industria eólica mundial con 93 GW de nueva potencia instalada. Actualmente, España es el quinto productor de energía eólica a nivel mundial.

3.1.1. Organización del negocio de la energía eólica.

Dentro de la organización del negocio de la energía eólica, es posible agrupar a los diferentes participantes tal y como se puede observar a continuación (Ilustración 16).

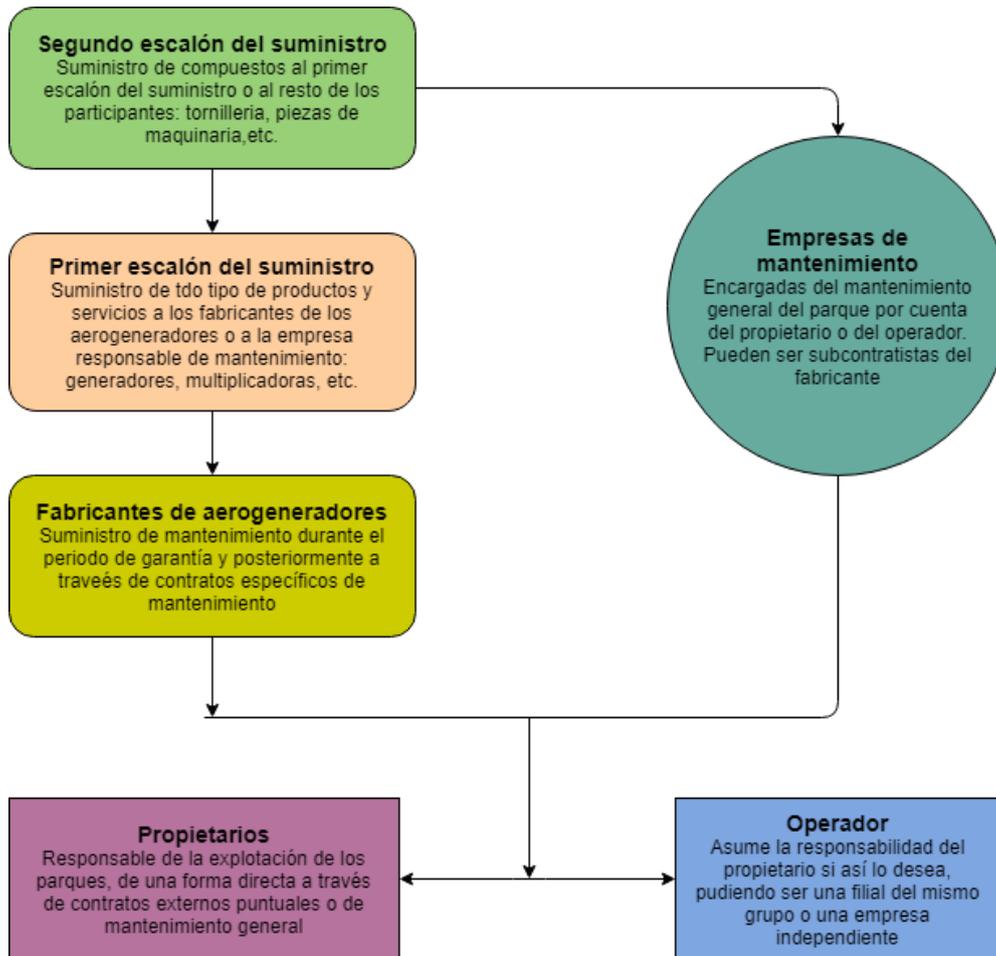


Ilustración 16. Organización del negocio de la energía eólica.

3.1.2. Elementos clave y situación actual de la eólica marina en España.

A finales de 2020, de los 743 GW de energía eólica instalada a nivel mundial, 35,2 GW correspondían a eólica marina y alrededor de dos terceras partes a parques offshore instalados en Europa (Ilustración 17).

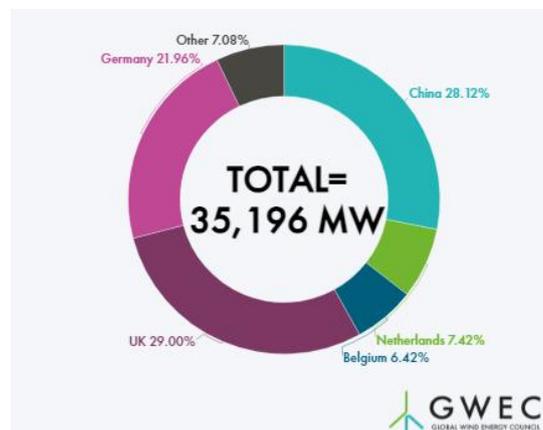


Ilustración 17. Potencia eólica offshore mundial acumulada a finales de 2020 [44].

Actualmente, España no dispone de parques eólicos marinos, conocidos como offshore en inglés, más allá del desarrollo de algunos proyectos puntuales de investigación, en contraste con la eólica terrestre y con otros países europeos que sí

están apostando con fuerza por la eólica marina. España cuenta con unos 6.000 kilómetros de costa en los cuales existe un abundante y estable recurso eólico. Pese a lo anterior, el principal problema es la singularidad de las costas. Al impacto visual y medioambiental que suponen estos proyectos se le añade la dificultad de instalación debido a la gran profundidad del suelo marino. La península ibérica tiene muy poca plataforma continental, por lo que la profundidad en la costa supera los 50 metros muy rápidamente, lo que se traduce en la imposibilidad de instalación de aerogeneradores de cimentación fija en gran parte de la costa española. Dichos factores hacen que la implementación de la eólica marina en España vaya orientada en su mayoría a la instalación de parques eólicos marinos flotantes.

Los avances realizados en eólica marina durante los últimos años suponen un importante vector de desarrollo adicional para España, posibilitando nuevos emplazamientos más alejados de la costa, los cuales cuentan con factores de capacidad muy elevados, y con una disminución muy significativa del impacto visual y ambiental respecto a ciertos proyectos desarrollados hace algunos años. Los esfuerzos en I+D+i enfocados a la reducción de costes, fundamentados en turbinas eólicas de mayor tamaño y un mejor aprovechamiento del viento, así como la optimización de las tecnologías empleadas y de los procesos productivos, han permitido la reducción del LCOE (Levelized Cost of Energy – Coste total actual de construir y operar una instalación generadora de energía a lo largo de toda su vida útil) hasta un 70% en menos de 5 años [45].

Además, algunos nuevos proyectos desarrollados en Europa con turbinas de 10 MW, han conseguido ahorros en los costes de inversión y mantenimiento todavía mayores, junto con factores de capacidad que superan el 50% en muchas localizaciones. Cabe destacar que, en algunas circunstancias, el LCOE de la energía eólica marina ya está siendo competitivo en ciertos mercados europeos con el resto de energías, como es el ejemplo de Alemania u Holanda, logrando poner en marcha proyectos sin necesidad de soporte económico adicional del Estado, lo que evidencia una anticipación a las predicciones más optimistas de años atrás.

Según apuntan los análisis de la Agencia Internacional de la Energía [46] el desarrollo de la tecnología eólica marina permitirá lograr reducciones de un 40% adicional del LCOE para el año 2030 hasta cifras entre 30-40 €/MWh, y reducciones del 60% para el año 2040.

Respecto a la eólica flotante, los numerosos avances tecnológicos desarrollados en los últimos años permiten actualmente la instalación de plataformas flotantes en aguas profundas, aportando viabilidad a nuevos emplazamientos que hasta hace no tanto tiempo eran económica y técnicamente inaccesibles. En Europa, el coste de la eólica flotante de proyectos precomerciales de pequeña escala es de alrededor de 180-200 €/MWh, no obstante, algunos proyectos de mayor envergadura logran una reducción significativa de la inversión propiciada por el efecto de las economías de escala, consiguiendo cifras de 80-120 €/MWh en los primeros proyectos comerciales previstos a partir del año 2023, utilizando tecnologías existentes ya aprobadas. Por último, atendiendo al horizonte 2030 se estima una aceleración considerable en el desarrollo y la maduración de la eólica flotante en Europa, alcanzando una reducción de costes hasta 80-100 €/MWh para 2025 y 40-60 €/MWh en 2030 [47].

3.2. Descripción técnica del aerogenerador y sus componentes.

Actualmente existen diversos tipos de aerogeneradores, principalmente diferenciados por su potencia, aunque de apariencia y componentes similares. Es por esto que para el caso de estudio que afecta a este trabajo se ha optado por centrar la descripción en un modelo general como el siguiente, ya que se trata del aerogenerador de mayor implantación industrial, en este caso el modelo AW300 de Acciona [48].

El diseño de un aerogenerador convencional consta de un tren de potencia distribuido, formado por el rotor eólico, el eje lento, la multiplicadora, el acoplamiento elástico y el generador (Ilustración 18).

El rotor eólico suele estar formado por tres palas acopladas a un buje de fundición, recubierto dicho buje por el cono-nariz, cuyo material suele ser poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Los demás componentes del tren de potencia, excepto el generador, descansan sobre el bastidor delantero, alojado éste ya dentro de la góndola o nacelle. El generador descansa sobre el bastidor trasero, alojado también dentro de la góndola.

Todos los componentes situados en la góndola están protegidos por la carcasa exterior de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Dicha góndola se encuentra asentada sobre el rodamiento dentado de yaw, el cual tiene una pista móvil unida al bastidor delantero y una pista fija unida a la torre. Mediante el uso de motorreductoras, instaladas en el bastidor delantero sobre el rodamiento, es posible la orientación del aerogenerador (yaw).

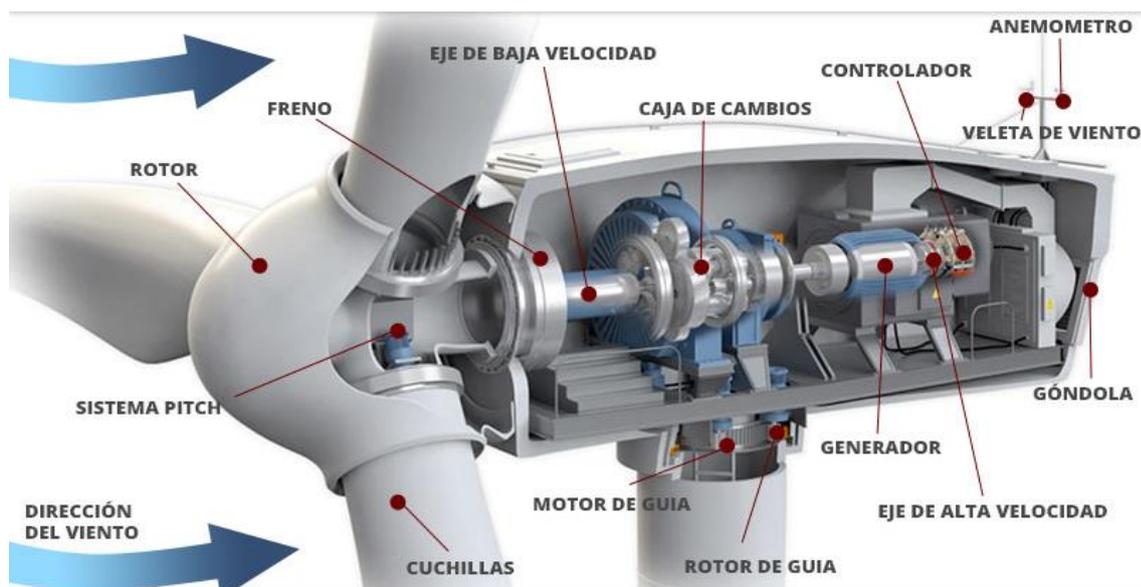


Ilustración 18. Componentes principales de un aerogenerador eólico [49].

A continuación, se describen los parámetros y características de los componentes principales de un aerogenerador eólico:

3.2.1. Cimentación.

Las características de la cimentación de los aerogeneradores se pueden clasificar dependiendo de si la torre es de hormigón o de acero:

- Cimentación para torre de hormigón: se trata de una estructura formada por elementos prefabricados de hormigón conocidos como dovelas. La unión de la torre de hormigón al terreno se hace mediante la introducción de unas barras (comúnmente conocidas como esperas en construcción) que sobresalen de las dovelas del tramo inferior de la torre en unas vainas embebidas en la zapata de hormigón. Después, se realiza el relleno de las vainas y el anillo de cimentación, ambos rellenos con mortero de alta resistencia. Por último, la torre entera es postensada, desde la parte superior hasta la cimentación.
- Cimentación para torre de acero: en este caso la torre está hecha de acero. La unión de la torre al terreno se lleva a cabo mediante una corona formada por una hilera concéntrica doble de pernos, embebida en una zapata de hormigón armado. La parte superior de dicha hilera de pernos situados verticalmente queda visible una vez realizado el fraguado del hormigón y, por tanto, preparada para anclar en ella el tramo inferior de la torre, de forma que una vez este asentado, se atornilla a la hilera. Las dimensiones, armadura y otros parámetros de la zapata de hormigón dependen del tipo y tamaño de la turbina y de las características geológicas del terreno.

3.2.2. Torre.

La posición vertical del aerogenerador viene determinada por la altura de la torre. A su vez, la altura de la torre varía en función del diámetro del rotor.

- Torre de hormigón: dependiendo de su altura, está formada por cuatro, cinco o seis tramos unidos entre sí. Cada tramo está compuesto por dovelas unidas, perfectamente selladas en sus juntas verticales con mortero de alta resistencia. A su vez, la unión entre los diferentes tramos se lleva a cabo introduciendo las barras de acero o esperas del tramo superior en las vainas del inferior y posteriormente es sellada la junta horizontal mediante mortero de alta resistencia.
- Torre de acero: se trata de una estructura con forma troncocónica tubular, compuesta por cuatro o cinco tramos. Los diferentes tramos van atornillados entre sí por las bridas situadas en sus extremos para formar conjuntamente la estructura de la torre. La brida inferior del primer tramo se atornilla a la hilera de pernos de la cimentación, mientras que la brida superior del último tramo se atornilla al rodamiento de yaw, el cual va fijado a la góndola.

La estructura portante de cada tramo de la torre está formada por chapas curvadas soldadas entre sí, conocidas como virolas, y también de las bridas inferior y superior, soldadas a su vez a las virolas.

A través de una puerta metálica situada en la parte inferior es posible acceder a su interior, donde se encuentran diversos componentes eléctricos y de control. Además, cabe la posibilidad de instalación de un elevador interior para facilitar el acceso a la góndola y los trabajos de mantenimiento. No obstante, la torre siempre dispone de una escalera manual de acceso hasta la góndola.

3.2.3. Góndola.

La góndola o nacelle está situada en la parte superior de la torre, orientándose según la dirección del viento mediante el sistema de orientación yaw. Su acceso se realiza desde el interior de la torre, a través de la escalera mencionada en el apartado anterior. Desde el interior de la góndola es posible acceder al buje para realizar su mantenimiento y comprobación sin necesidad de salir al exterior.

A continuación, se describen los principales componentes de los que dispone la góndola en su interior:

- Carcasa de protección: suele estar fabricada de poliéster reforzado con fibra de vidrio. En el exterior de la parte superior trasera se encuentran el sensor ambiental, denominado anemómetro y la baliza o luz de gálibo.

Para facilitar los trabajos de mantenimiento, en el suelo de la parte trasera dispone una trampilla con una pequeña grúa para la elevación de material. Además, dispone de algunas otras trampillas para facilitar la entrada de luz, así como para permitir la refrigeración y disipación de calor del generador o de la multiplicadora.

- Bastidor: dependiendo del modelo de aerogenerador, el bastidor puede estar formado por un solo elemento o formado por un bastidor delantero y uno trasero. Para aerogeneradores de dos bastidores, ambos de fundición nodular de gran robustez, el eje lento y rodamientos, el grupo hidráulico, las motorreductoras y la corona de giro irán apoyadas sobre el bastidor delantero, soportando éste elevadas cargas transmitidas por el rotor al eje principal y a la multiplicadora, mientras que el bastidor trasero, el cual va atornillado al delantero, soporta el generador.
- Eje lento y rodamientos: el eje lento es el encargado de transmitir la energía del viento recibida por el rotor en forma de energía cinética angular hasta la multiplicadora. Es muy común, que el eje principal de la turbina se coloque sobre el bastidor delantero con una inclinación respecto de la horizontal de aproximadamente 5 grados, con el objetivo de que, en situaciones de altas velocidades de viento, las palas no lleguen nunca a golpear la torre. Mediante dos soportes fijados al bastidor, los cuales contienen los dos rodamientos del eje lento, se soporta el peso del eje y los esfuerzos del rotor.
- Multiplicadora y acoplamiento elástico: la multiplicadora es el equipo encargado de transferir el par desde el eje lento hasta el eje rápido del aerogenerador elevando la velocidad angular. La transmisión suele estar formada por una etapa paralela y dos planetarias. A su vez, dependiendo del modelo de aerogenerador, el factor multiplicativo será variable, ya que el rango de velocidades angulares de operación del rotor es dependiente del tamaño del rotor.

Por otro lado, el eje rápido es el encargado de conectar el eje de salida de la multiplicadora con el eje del generador. Dicho eje rápido está formado por un acoplamiento elástico capaz de transmitir la potencia en forma de par de torsión, a la vez que absorbe desalineaciones de los ejes de la multiplicadora y del generador.

La multiplicadora va situada en el extremo anterior del eje lento, apoyando sus puntos de reacción sobre dos anclajes del bastidor delantero. Dichos anclajes están formados por soporte elásticos encargados de amortiguar las vibraciones y reducir el ruido.

Además, la multiplicadora dispone de su propio sistema de lubricación y refrigeración forzada. Mediante este sistema es posible realizar la lubricación y refrigeración de engranajes y rodamientos a través de un circuito cerrado de aceite a presión y temperatura controladas con distintas etapas de refrigeración y filtrado.

Por último, la multiplicadora cuenta con un freno de disco hidráulico y un sistema de bloqueo del tren de potencia en su parte trasera.

- **Generador:** es el elemento encargado de convertir la energía mecánica proveniente de la multiplicadora en energía eléctrica. Los generadores empleados en aerogeneradores eólicos presentan la peculiaridad respecto a otros generadores ordinarios de que están conectados directamente a la red eléctrica. Además, el generador debe trabajar con una fuente de alimentación (rotor de la turbina) que suministra potencia mecánica muy variable (par variable). El modelo de generador más común instalado en aerogeneradores es asíncrono trifásico de inducción, de rotor bobinado y excitación por anillos rozantes, permitiendo de esta forma inyectar o extraer potencia del rotor.

La frecuencia de trabajo (50/60 Hz) variable permite la generación de energía a diferentes velocidades de rotación según la velocidad del viento, situadas normalmente entre 800 y 1800 rpm dependiendo del tamaño del aerogenerador. Por lo general, en los aerogeneradores con una potencia en torno a 100-150 KW la tensión generada por la turbina suele ser de 690 V trifásica de corriente alterna AC. La corriente generada circula posteriormente a través de un transformador anexo al aerogenerador o situado dentro de la torre elevando el valor de la tensión hasta un valor normalmente de entre 10 KV a 30 KV y a una frecuencia de 50 Hz, dependiendo del estándar en la red eléctrica de la ubicación del aerogenerador.

En función de la potencia, los aerogeneradores se pueden clasificar en tres unidades básicas diferentes:

- Pequeñas: < 1 MW.
- Medianas: 1 - 2 MW (tamaño más utilizado hoy en día).
- Grandes: > 2 MW.

El generador va apoyado sobre el bastidor sobre unos elementos amortiguadores y reductores de ruido llamado Silent-Blocks. Además, su refrigeración normalmente se realiza mediante ventilación forzada por medio de ventiladores, incrementado así el intercambio de calor, aunque algunos fabricantes utilizan sistemas de refrigeración por agua para su ventilación.

- **Sistema de yaw:** es el sistema encargado de orientar la góndola respecto a la dirección del viento predominante en cada momento. Consiste en una corona dentada, la cual es solidaria a la torre y motorreductoras solidarias a la góndola

engranadas en los piñones de la corona, lo que permite que la góndola gire en ambos sentidos con respecto a la torre sobre el rodamiento. Además de los frenos eléctricos de los que disponen los motores eléctricos de las motorreductoras y que permanecen activados cuando no hay tensión, el sistema de yaw dispone de otro freno activo, formado por un freno hidráulico encargado de fijar mecánicamente la posición de la góndola en función de la orientación y un disco de freno instalado entre la torre y el rodamiento.

- Sistema de monitorización: sistema de monitorización en continuo destinado al mantenimiento predictivo. Su instalación permite medir algunos parámetros como las vibraciones, las temperaturas o el estado del aceite de la multiplicadora.

Las distintas posibilidades y alternativas existentes hoy en día en cuanto al sistema de monitorización serán analizadas en profundidad más adelante, como objeto de estudio de este trabajo.

- Sistema de engrase centralizado: en algunos modelos de aerogeneradores cabe la posibilidad de instalación de un sistema de engrase centralizado en continuo y de forma automática, para la lubricación de diversos elementos como el engrane corona – piñón del sistema de yaw, el propio rodamiento de yaw y demás rodamientos del aerogenerador.

3.2.4. Rotor eólico.

El rotor eólico es el conjunto de elementos del aerogenerador que giran en el exterior de la góndola y cuya función es captar la energía del viento y transformarla en energía cinética de rotación. El rotor suele estar compuesto por tres palas montadas sobre un buje de fundición, el cual está cubierto por el conocido cono-nariz, cuyo material suele ser poliéster reforzado con fibra de vidrio como el de la carcasa de la góndola.

La velocidad del rotor viene determinada por su regulación mediante una combinación de control de par resistente del generador en momento de vientos bajos y de control de pitch cuando los vientos son altos. El sentido de giro del rotor suele ser en sentido horario desde su vista frontal.

El rotor eólico está formado por los siguientes elementos principales:

- Buje: es el elemento encargado de transmitir la energía de las palas hasta el eje lento. La unión de ambos elementos se realiza mediante pernos y bulones adicionales de cortadura. Dispone de varias aberturas para el acceso hasta los distintos rodamientos, al cono-nariz y a ciertos componentes del sistema de pitch. El buje suele estar fabricado en fundición.
- Sistema de pitch: es el sistema encargado de la orientación de la pala. Su accionamiento es independiente para cada una de las palas, de forma que es posible variar el ángulo de paso girando sobre su eje longitudinal, desde la posición de producción con la mayor superficie de pala expuesta a la dirección del viento, hasta la posición de bandera-parada. A su vez, el sistema de pitch actúa como freno aerodinámico cuando la posición de las palas es la de bandera, siendo necesario la colocación de una sola de las palas en esta posición para detener el rotor.

En algunos modelos, como complemento adicional de seguridad, cada pala dispone de un acumulador de nitrógeno situado en el buje, en el cual hay una reserva permanente de aceite a presión capaz de llevar la pala a la posición de bandera, incluso en situaciones de falta de tensión de alimentación en el grupo hidráulico.

- Cono-nariz: su función principal es la de proteger al buje de las inclemencias meteorológicas. Como se dijo anteriormente, suele estar fabricado de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Su diseño adaptado al buje permite el acceso seguro al interior del buje sin necesidad de salir al exterior de la turbina.
- Palas: el diseño más común de aerogenerador dispone de tres palas ya que actualmente se trata del diseño más eficiente desde el punto de vista técnico, aunque existen otros diseños, conectadas al buje a través de los rodamientos de pala. Su material suele ser fibra de vidrio y carbono reforzada con poliéster, además tienen un recubrimiento superficial para protegerlas de la radiación ultravioleta. Cada pala está formada por dos “conchas” exteriores y la estructura de vigas interior que las soporta. La longitud de las palas de los aerogeneradores más utilizados en la producción de energía eólica a gran escala suele ser de entre 45 y 65 metros.

3.3. Regulación, control y comunicación.

Un aerogenerador dispone de varios sistemas de regulación y control orientados a garantizar el correcto funcionamiento del mismo, así como facilitar los trabajos de mantenimiento que requiera en cada momento. Algunos de estos sistemas tienen como funciones principales: monitorizar las condiciones del aerogenerador, control de la velocidad de giro, captación de datos medioambientales, tanto meteorológicos como la velocidad del viento y la medición de vibraciones y tensiones en sus elementos.

Como se expuso en párrafos anteriores, un sistema fundamental en el aerogenerador es el *Pitch*, mediante el cual es posible llevar a cabo la regulación y el control de la velocidad de giro del rotor, protegiendo a la máquina de situaciones en las que la velocidad de giro alcanza un valor superior al admisible desde un punto de vista estructural.

Además, el sistema de regulación de la orientación de la turbina (sistema de *Yaw*) que, al recibir la dirección del viento a través de la adquisición de datos de la veleta (sensores atmosféricos), posiciona la turbina en la dirección más adecuada para que la incidencia del viento sea la más óptima posible, de forma que el rendimiento sea máximo. Por tanto, el sistema electrónico se encargará de fijar las coordenadas de posicionamiento de la turbina, que deberán ser las mismas que la posición real obtenida. No obstante, no es adecuado modificar la orientación del aerogenerador para pequeñas variaciones en la dirección del viento, ya que no resultaría rentable energéticamente el beneficio del reposicionamiento respecto de las pérdidas energéticas del mismo.

Mediante el siguiente diagrama de bloques (Ilustración 19) se pretende mostrar la estructura de control y monitorización ideal o completa de un aerogenerador, representando cada bloque una capa del sistema.



Ilustración 19. Capas de la estructura del sistema de control y monitorización ideal de un aerogenerador.

Cabe destacar, que el diagrama anterior muestra un listado completo de todas las capas que se podrían implementar según la tecnología existente, no siendo necesarios todos los componentes citados para realizar una correcta monitorización y mantenimiento de un aerogenerador y por tanto de un parque eólico.

Como sistema de control del aerogenerador, el controlador electrónico, a través de un ordenador monitoriza continuamente las condiciones y si ocurre alguna anomalía, dispone de la posibilidad de parar automáticamente la turbina y transmitir una alarma mediante comunicación online. De esta forma, actualmente algunos parques eólicos más modernos disponen de su propia red informática, encargada de volcar todos los datos proporcionados por el sistema de monitorización (*Condition Monitoring System*) y los sensores ambientales a un SCADA.

En las siguientes páginas se abordará en detalle las distintas alternativas y posibilidades que existen hoy en día en cuanto a la implantación del *Condition Monitoring System*, así como los beneficios técnicos y económicos que aporta su instalación en aerogeneradores eólicos.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN.

Una vez completado el marco teórico necesario para poner en contexto el análisis comparativo y vista la importancia de la energía eólica en España y en el mundo, el objetivo fundamental de este análisis se basa en ofrecer una exposición alrededor de las experiencias más representativas en la implementación de sistemas de Condition Monitoring y de detección de fallos en aerogeneradores eólicos, enfocadas a reducir los costes de OyM (operación y mantenimiento) y a alargar la vida útil de los equipos, ya que actualmente gran parte del parque eólico a nivel nacional se encuentra al final de su vida útil. Tradicionalmente, los planes de mantenimiento que se vienen aplicando a los aerogeneradores eólicos son de tipo periódico o preventivo convencional, fundamentados en su mayoría en labores y periodos de mantenimiento recomendados por los fabricantes de los equipos. De esta forma, resulta lógico considerar la aplicación de planes de mantenimiento que tengan en cuenta de forma continuada y durante toda la vida del aerogenerador cuáles son sus condiciones de funcionamiento, además del efecto real que tienen dichas condiciones en el estado de operación y salud de cada uno de los componentes que lo forman.

El mantenimiento basado en la condición es un enfoque especialmente adecuado para aquellas instalaciones que, debido a una difícil accesibilidad, ya sea por su ubicación en entornos remotos, la disponibilidad de la maquinaria o la dependencia de las condiciones climatológicas, hacen preciso una planificación y ejecución del mantenimiento optimizados.

España, por su condición de pionera en la energía eólica, es uno de los primeros países del mundo al que se le presenta el reto de enfrentarse a la finalización de la vida útil de sus parques eólicos (Ilustración 20). Actualmente, en España existen 21.419 aerogeneradores instalados en 1.265 parques eólicos, con una potencia total de 27.446 MW. De esta potencia 11.569 MW han alcanzado una antigüedad igual o superior a 15 años, 3.495 cuentan con 20 años o más y en torno a 2023 superan los 25 años, la mayoría de ellos con tecnología obsoleta.

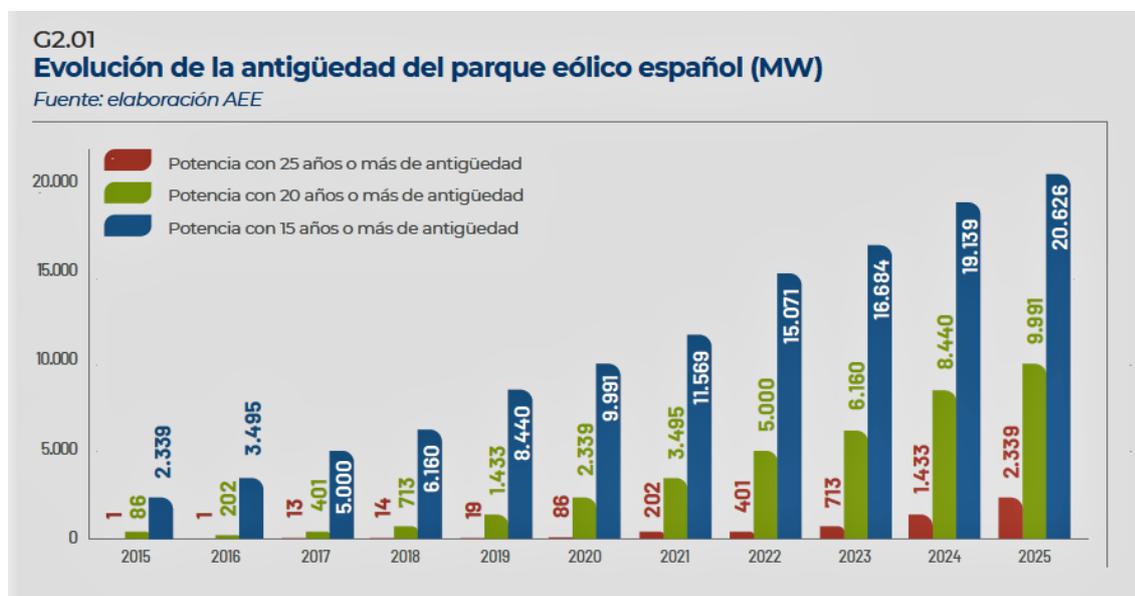


Ilustración 20. Evolución de la antigüedad del parque eólico español (MW) [43].

Por tanto, ante dicho escenario, y teniendo en cuenta que la vida útil de diseño de un aerogenerador eólico está fijada en 20 años, de acuerdo a los criterios de certificación de la IEC-61400-1 basados en las cargas de fatiga que debe soportar el aerogenerador durante esos 20 años, una gran cuota de la potencia instalada en España está expuesta a la toma a corto plazo de decisiones importantes sobre el futuro de los parques eólicos. Dentro de las posibles opciones para atajar el problema en cuestión destacan las siguientes (Tabla 2).

- **Repotenciaci3nes:** se basan en el desmantelamiento y sustituci3n de los aerogeneradores instalados por otros nuevos con tecnologa m1s avanzada, de mayor tama1o y eficiencia, capaces de mejorar el aprovechamiento del recurso primario, al incrementar la capacidad de generaci3n para la misma disponibilidad de viento. La repotenciaci3n lleva consigo inversiones elevadas, del orden del 80-85% del coste de un nuevo parque e3lico, y tramitaciones administrativas complejas, con el objetivo de la mejora en la producci3n y por tanto mayores ingresos, aunque teniendo en cuenta la necesidad de amortizaci3n de la inversi3n. Por otro lado, los aerogeneradores retirados suponen algunos ingresos adicionales como se ha podido ver en los 3ltimos parques repotenciados en Espa1a que, por lo general, est1n superando las previsiones iniciales de los modelos financieros.
- **Extensi3n de la vida 3til de los aerogeneradores:** se trata de alargar la vida del parque e3lico y por tanto de sus aerogeneradores por encima de la vida 3til certificada, lo que en muchas ocasiones conlleva una mejora operativa de los equipos existentes. La ampliaci3n de la vida 3til se lleva a cabo mediante la sustituci3n de ciertos componentes, sin realizar grandes inversiones adicionales, con el objetivo de mantener una indisponibilidad m3nima bajo unas condiciones de seguridad garantizadas. Adem1s, se realizan mejoras para alcanzar valores cercanos a los de un parque nuevo, con un coste que puede llegar a ser inferior al 15% de un aerogenerador nuevo.

Tabla 2. Comparativa extensi3n de vida – repotenciaci3n. Elaboraci3n propia basada en [43].

EXTENSI3N DE VIDA	REPOTENCIACI3N
Esta opci3n no es recomendable para parques e3licos sin repuestos u obsoletos.	3nica opci3n para parques con baja disponibilidad, sin repuestos y con obsolescencia tecnol3gica.
Inversi3n menor al afectar parcialmente a los equipos y tener un car1cter peri3dico.	Elevada inversi3n por la sustituci3n de los aerogeneradores, y por tanto mayor apalancamiento financiero y mayor riesgo.
Mantiene un m3nimo de producci3n y ya que la inversi3n est1 amortizada, el margen tiene que ser suficientemente atractivo.	Aumenta la producci3n por la mejora de la disponibilidad, los sistemas de control avanzados y el mayor tama1o del rotor de la turbina.

Viabilidad a corto plazo, menor sensibilidad a los cambios regulatorios. Mayor sensibilidad a los cambios regulatorios, al necesitar más años para su amortización.

La potencia del parque no se ve incrementada, por lo que resulta necesario mantener unas horas mínimas de funcionamiento. Ofrece la posibilidad de aumentar la potencia del parque, si existe suficiente capacidad de acceso y conexión a la red, ya que el terreno es suficiente.

Mantiene la carga de trabajo en las áreas de fabricación y reparación de componentes. Aumenta la carga de trabajo en equipos nuevos e incentiva el desarrollo de productos para su exportación.

Pone en valor nuevos métodos de mantenimiento, en base a la extensión de la vida útil de los equipos y evitando fallos por fatiga. Además, se introducen nuevas soluciones de ingeniería inversa, así como la digitalización de las máquinas, a través de la monitorización, BigData...

Por tanto, las alternativas existentes ante la finalización de la vida útil de un parque eólico, ordenadas de mayor a menor inversión son:

- Repotenciación: requiere de inversión.
- Renovación de equipos para extender la vida útil: requiere de inversión.
- Operación hasta agotar la vida útil del parque: no requiere de inversión.

La extensión de vida de los parques eólicos es una de las cuatro palancas clave para maximizar el retorno de la inversión en la industria de la energía eólica. Junto con la disponibilidad, la eficiencia y los costes de operación y mantenimiento, la vida útil representa posiblemente la palanca con un mayor margen para aumentar la rentabilidad de la inversión en el parque eólico. Atendiendo a los continuos cambios regulatorios en muchos países como España, en los cuales las reducciones de las ayudas a la generación renovable han sido significativas, la extensión de la vida útil de los parques se presenta como una de las únicas vías para mantener una rentabilidad razonable de los activos eólicos, por lo que muchos propietarios y promotores de parques están considerando esta opción frente a otras como la repotenciación y el desmantelamiento.

Tal y como se ha comentado, los aerogeneradores están diseñados para una vida útil de 20 años, bajo unas condiciones generales de viento y operación que vienen definidas en guías de diseño y normativas internacionales vigentes. No obstante, las condiciones reales de viento son en la mayoría de los casos menos exigentes de lo estimado. Es muy probable que después de los 20 años de operación previstos las estructuras y componentes del aerogenerador no hayan consumido aun toda su vida útil. Es por esto, que uno de los retos de la extensión de vida o LTE (Life Time

Extensión por sus siglas en inglés), consiste en determinar cuánto tiempo más pueden operar los componentes más críticos de la máquina, sin incrementar notablemente los costes de operación y mantenimiento, garantizando unas condiciones de seguridad óptimas y considerando que cada tipo de aerogenerador y componente tiene una sensibilidad diferente a las condiciones reales de contorno durante su operación.

Los aerogeneradores instalados hace alrededor de 20 años, fueron diseñados con mucho margen respecto a las condiciones estándar, principalmente por la inmadurez tecnológica del momento y también por la menor competencia entre fabricantes, ya que en muchos mercados y momentos temporales hubo más demanda que oferta. Por otra parte, las estimaciones de recurso eólico realizadas hace 20 años eran mucho menos precisas, por lo que los errores de caracterización del viento fueron bastante grandes, en la mayoría de los casos sobrevalorando el recurso energético. La consecuencia de esto es que, si muchos de estos se han mantenido en buenas condiciones de mantenimiento y operación, es muy probable que dispongan de mucho margen de extensión de vida.

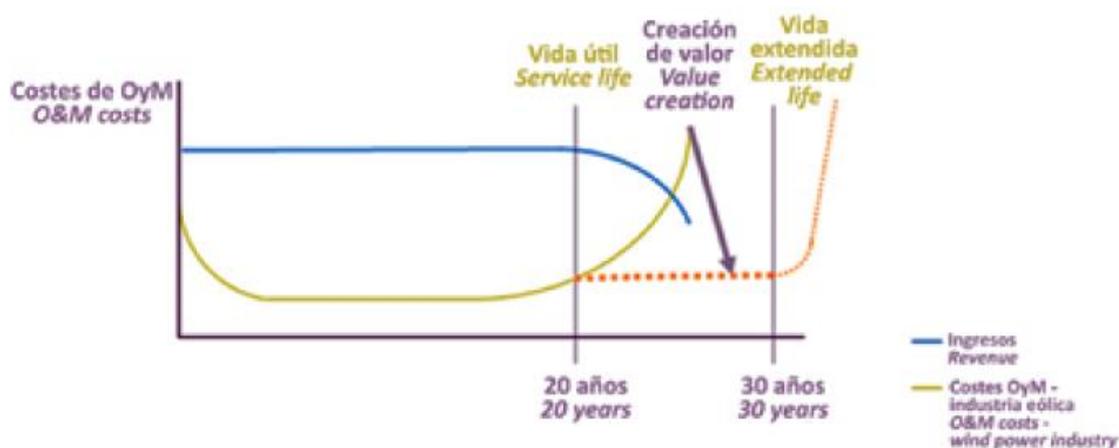


Ilustración 21. Evolución de los costes de O&M durante la vida útil de un parque eólico. Fuente: Siemens Gamesa Renewable Energy.

En la ilustración anterior (Ilustración 21), se observa cómo a partir de un periodo de tiempo determinado, los costes de O&M de un parque eólico se incrementan exponencialmente, ocasionado por el aumento de la tasa de fallos de los componentes, que comúnmente sigue una forma de conocida como “curva de bañera”, que indica más fallos al principio y al final de la vida útil. Por tanto, el incremento de estos costes a largo plazo es incompatible con los ingresos que tendría el parque eólico en el futuro, compuestos únicamente de la venta de electricidad, y teniendo en cuenta la tendencia a la baja de los precios de la energía durante los próximos años.

La extensión de vida del parque eólico supondría alargar la parte final de la “curva de bañera”. Para llevar a cabo este proceso, los métodos de mantenimiento predictivo y preventivo basados en el uso de la monitorización y de otros tipos de tecnologías emerge como un factor clave para garantizar la continuidad de los parques eólicos en condiciones de operación adecuadas, evitando a su vez, los costosos métodos de mantenimiento correctivo.

Según UL-DEWI [50], los conceptos de extensión de vida de parques eólicos se pueden clasificar en función de tres estrategias distintas:

- LTE pasivo: no se lleva a cabo ningún cambio en componentes de máquina ni modificaciones en las condiciones de operación del parque. Las posibilidades de extensión de la vida útil están relacionadas con el margen existente entre las condiciones reales y las de diseño.
- LTE operacional: se realizan actuaciones sobre las condiciones de diseño a fin de reducir el consumo de vida, ya sea por paradas, por reducción de horas equivalentes o por reducción de la potencia nominal, en relación al previsto en un primer momento.
- LTE estructural: se llevan a cabo labores sobre la máquina, como el refuerzo de ciertos elementos o la sustitución de algunos componentes con prestaciones superiores, en su mayoría con posibilidad de modificación en su control.

En base a la clasificación anterior, realizando una inversión reducida destinada a la renovación de componentes críticos y a la mejora del mantenimiento, es posible controlar a largo plazo los costes de OyM, compensando a su vez el decremento en los ingresos provocados por los cambios regulatorios (fin de incentivos a las renovables) y por la disminución de precios del mercado eléctrico. En este sentido, los proyectos de extensión de vida útil permiten aumentar la rentabilidad o TIR (Tasa Interna de Retorno) de los parques eólicos más antiguos. Por ejemplo, se estima que un parque de 15 MW puede incrementar su TIR en 2 puntos básico extendiendo su vida útil en 10 años, desde los 20 previstos hasta los 30 años extendidos.

Las empresas, a fin de analizar y conocer de forma precisa el potencial de extensión de vida de un parque eólico, llevan a cabo complejos cálculos analíticos y modelos aerolásticos a partir de datos reales de viento, los cuales más tarde son validados mediante procesos de verificación e inspección en campo. Mediante estas técnicas, es posible simular las cargas equivalentes de fatiga a las que cada componente del aerogenerador se ha visto sometido durante las condiciones reales de operación y de esta forma, realizar una estimación precisa de su vida remanente (RUL – Remaining Useful Life por sus siglas en inglés).

A modo de ejemplo, un estudio realizado por K2 Management ha determinado que los propietarios de parques eólicos pueden aumentar sus ganancias en un 2% si realizan la planificación de la extensión de vida de los parques en una etapa temprana de su vida útil, en lugar de empezar el proceso en el último año. Dicho estudio, se fundamenta en los datos obtenidos de un parque eólico situado en Alemania de 24 MW, con un factor de capacidad de 35 y un potencial de extensión de vida hasta los 25 años. Los cálculos de K2 Management muestran que si se inicia la monitorización de los aerogeneradores cuando tienen 10 años de vida, los propietarios pueden comenzar a adaptar el programa de mantenimiento, y de esta forma optimizar la configuración del servicio y el contrato de operación y mantenimiento para facilitar la extensión de la vida útil hasta los 25 años.

4.1. Métodos y conceptos del monitoreo por condición en aerogeneradores. Técnicas CMS y FDS.

A diferencia de otros tipos convencionales de producción de energía, los parques eólicos se encuentran sumamente expuestos a las inclemencias y variabilidad de las condiciones climáticas. Dicha variabilidad, provoca grandes esfuerzos mecánicos, desgastes y alteraciones en los aerogeneradores, resultando de suma importancia la implementación de un sofisticado sistema de mantenimiento, a fin de garantizar una producción de energía rentable y proteger la vida útil del sistema.

Las turbinas comerciales no suelen disponer de un sistema de mantenimiento completo y sofisticado, en base a técnicas de monitoreo de la condición y detección temprana de fallos. Estas, normalmente llevan incorporado un sistema de monitoreo básico en línea, es decir, su sistema de control. Por lo general, este sistema cuenta con sensores para monitorear parámetros del equipo como las velocidades, temperaturas en varios componentes, desbalance de fase de línea, niveles de fluidos, niveles de tensión eléctrica y vibración en la torre y algún componente más como ejes y cojinetes [51].

Las cargas que soporta un aerogenerador eólico vienen determinadas en su mayoría por las condiciones de viento extremo, produciendo paradas automáticas, fatiga, o incluso daños en algunos de sus componentes. Este tipo de situaciones son inevitables y conocidas en el funcionamiento de un aerogenerador, por lo que estos están diseñados para soportarlas. No obstante, el impacto que causan estos fenómenos puede ser mitigado en gran medida mediante la adaptación dinámica del aerogenerador [52].

Como ya se introdujo en capítulos anteriores, un sistema de Condition Monitoring proporciona información de diagnóstico sobre el estado de los diferentes elementos que conforman el aerogenerador. Realizando una gestión adecuada de esta información, es posible programar las tareas de mantenimiento o mejor aún, realizar las reparaciones antes de que el problema sea más grave, lo que provocaría una interrupción en la generación de energía, repercutiendo directamente en la pérdida de retorno económico. En algunas ocasiones, la realización de acciones correctivas puede ser planificada, reduciendo las consecuencias negativas. Además, si se produjera un fallo severo, con la ayuda del Condition Monitoring es posible facilitar la planificación de las labores logísticas del equipo de mantenimiento, y por tanto, minimizar el coste del reemplazo o reparación [53].

Por otra parte, los FDS (Fault Detection System) cuentan con diversos ejemplos de éxito dentro de la industria, a fin de aumentar la confiabilidad y la seguridad de los equipos. Los FDS, fundamentan su aplicación en la evaluación de datos tomados aislando ciertos fallos incipientes, los cuales son apreciables óptica ni acústicamente. En este sentido, el equipo puede ser reparado previamente a que el componente sufra un daño severo o cause daños en otros elementos. Mediante un sistema FDS no solo es posible mejorar la seguridad operacional del equipo, sino que al igual que el Condition Monitoring también permite establecer estrategias de mantenimiento predictivo y basado en la condición, posibilitando la estimación del grado de deterioro del componente o su tiempo de vida útil remanente [54].

4.1.1. Detección de fallos en aerogeneradores.

Previo paso al estudio de los diferentes métodos y alternativas en el monitoreo por condición en aerogeneradores, se analizarán los fallos más recurrentes producidos durante el funcionamiento de aerogeneradores. Dichos fallos suelen estar localizados principalmente en las palas, el rotor, los ejes, los rodamientos, la multiplicadora, el sistema de orientación de la góndola y el generador eléctrico. Estos componentes del aerogenerador son los más expuestos tanto al desgaste y la fatiga por el funcionamiento, como al deterioro por el propio paso del tiempo y las inclemencias meteorológicas, de forma que serán los más susceptibles de ser monitoreados y controlados con mayor asiduidad.

Debido a la intermitencia inherente en la generación de energía eólica, la fiabilidad de los aerogeneradores toma un valor esencial en un entorno tan competitivo como es el mercado energético. En esta línea, la optimización del mantenimiento adquiere un papel fundamental para elevar la disponibilidad de los aerogeneradores, no obstante, es necesario determinar qué componentes requieren una mayor atención, ya que una disponibilidad elevada no corresponde estrictamente a una correcta gestión del mantenimiento, sino a la actuación de un servicio rápido en caso de falla.

Hoy en día, tal y como se expuso al inicio del capítulo, debido a la antigüedad de los aerogeneradores y al sistema básico de monitorización del que disponen estos, los operadores de parques eólicos no cuentan en diversas ocasiones con análisis que ofrezcan información sobre las consecuencias en el proceso de producción de energía eólica, en el caso de que un componente del aerogenerador sufriera un fallo, reduciendo esto su capacidad y la rapidez de invertir recursos en el mantenimiento de elementos críticos del equipo que supongan un riesgo elevado para la operatividad del parque. Dichos factores, conducen a estrategias de mantenimiento insuficientes, lo que se ve repercutido en la disponibilidad de los aerogeneradores, provocando altos costes de mantenimiento.

Poniendo atención a lo anterior, resulta necesario llevar a cabo análisis que permitan jerarquizar los elementos que conforman el aerogenerador en función del grado de afectación al proceso de generación de energía, determinando qué componentes suponen un riesgo mayor para el equipo, de forma que los recursos y el esfuerzo se orienten a las áreas donde sea más inminente aumentar la fiabilidad, permitiendo así desarrollar planes de mantenimiento óptimos enfocados a la reducción de costes y a aumentar la disponibilidad de los aerogeneradores [55].

Por tanto, como consecuencia de las condiciones de operación y del entorno, los distintos elementos que forman el aerogenerador están expuestos a sufrir fallos. Dichos elementos pueden sufrir un fallo, el cual provoca una alteración en su estructura o en sus parámetros limitando su funcionamiento nominal, aunque sin restringir su operatividad. Por otro lado, si se produjese un fallo severo en el elemento, ahora sí implicaría la inhabilitación del componente para operar [56].

En este sentido, los fallos en aerogeneradores eólicos pueden aparecer a nivel de elemento o a nivel de sistema general, lo que indica la necesidad de monitorizar y sensorizar los posibles fallos a nivel de elemento, ya que estos se pueden propagar a nivel general del sistema y afectar al resto de componentes, propiciando que un fallo

en un elemento de menor entidad en el sistema, ocasionalmente pueda llegar a dejar fuera de operación a todo el equipo.

Los sistemas de detección de fallas buscan evitar daños severos en los elementos del equipo, facilitando la implementación de estrategias óptimas de mantenimiento y reparación, de forma que, cuando se detecta una anomalía es crucial realizar un diagnóstico a fin de conocer la ubicación, la tipología y el nivel de criticidad del fallo, con el fin de realizar las labores de mantenimiento más adecuadas.

Mediante la aplicación de métodos de gestión de mantenimiento eficientes que incluyan diagnóstico, detección y predicción de fallas, y planes de mantenimiento basados en análisis de datos, es posible obtener ciertas ventajas como [57]:

- Evitar fallas prematuras, fallas severas o la propagación de fallas menores por todo el equipo.
- Reducciones significativas de los costes de mantenimiento, ya que la implementación de planes de mantenimiento eficientes limita las acciones innecesarias.
- Desarrollar una base de datos en el tiempo sobre aspectos clave del comportamiento de los aerogeneradores.
- Suministrar información al operador del parque eólico, facilitando la operatividad y el proceso de toma de decisiones.

Entre los distintos tipos de enfoques para la detección de fallas, destacan principalmente: la redundancia de hardware, el enfoque basado en modelos y el enfoque basado en análisis de señales y datos.

El enfoque basado en modelos (Ilustración 22) se fundamenta en una representación del proceso programada en un ordenador, de forma que se realiza la modelización cuantitativa y cualitativa del comportamiento dinámico del aerogenerador y su funcionamiento en régimen permanente. La diferencia entre las estimaciones obtenidas en el modelo y las variables medidas mediante la sensorización durante el proceso se denomina valor residual. Por tanto, dicho valor residual es empleado como indicador de falla, ya que representa la desviación entre los cálculos obtenidos de la ecuación del modelo y las mediciones de los sensores, de forma que si dicho indicador cruza un umbral predefinido es posible detectar que una falla está ocurriendo. Finalmente, a través de la herramienta de diagnosis se detecta el tipo de fallo que está ocurriendo y se disponen a generar una alarma.

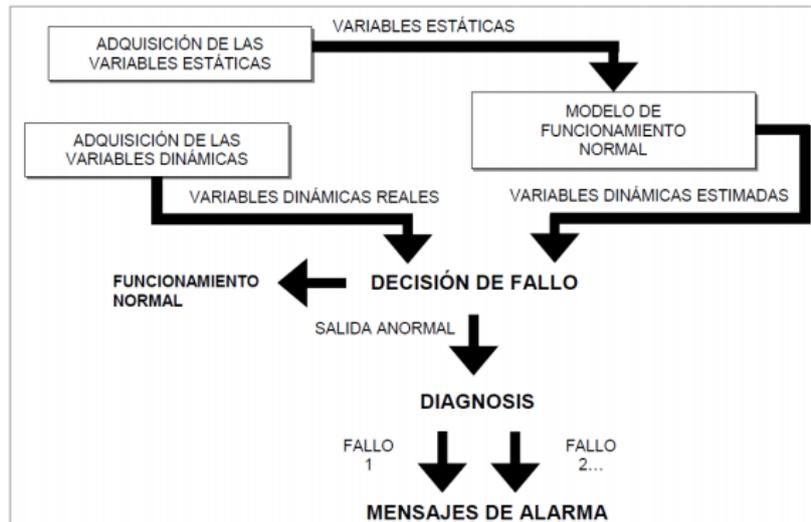


Ilustración 22. Esquema del enfoque basado en modelos [58].

Por otra parte, el enfoque basado en análisis de señales, supone que las señales del proceso de funcionamiento del aerogenerador transportan cierta información sobre las posibles fallas que pueden ocurrir, de forma que mediante un procesamiento adecuado de estas señales es posible la detección de fallas. De estas señales, los síntomas más repetidos son valores medios aritméticos o cuadráticos, funciones en el dominio del tiempo como magnitudes, tendencias o funciones en el dominio de la frecuencia como líneas espectrales de frecuencia y densidades de potencia espectral [56]. La mayor parte de los enfoques desarrollados para la detección de fallas, utilizan datos específicos tomados por distintos sensores y sistemas de adquisición de datos. Dichos valores de medición y datos de funcionamiento del equipo, aparte de ser empleados en la detección de fallas, deben quedar almacenados para su utilización en análisis posteriores. No obstante, a fin de llevar a cabo análisis robustos, son necesarios varios conjuntos de datos, como los mencionados anteriormente: datos técnicos del equipo analizado, datos de operación y mantenimiento, datos de fallas en el tiempo e información general sobre costos [59].

Actualmente, como se expuso anteriormente, el problema que sufre la industria eólica en este sentido y en España en particular, principalmente debido a la antigüedad del parque eólico, lo cual se traduce en sistemas de monitorización muy básicos, obsoletos o en algunos casos inexistentes, es que generalmente los datos se encuentran perdidos en distintas bases de datos o directamente no existen, por lo que no se dispone de datos históricos de fallas y tiempos de paro de los aerogeneradores, debiendo en muchas ocasiones recurrir a bases de datos generales. Todo esto provoca grandes dificultades a la hora del análisis posterior de los datos y en la toma de decisiones, resultando necesaria la creación de bases de datos robustas y uniformes, que contengan los diferentes parámetros de operación de una forma específica para cada ubicación y tipología de parque eólico, garantizando el análisis posterior y el proceso de seguimiento durante la vida del aerogenerador.

4.1.2. Fallos más severos sufridos por los aerogeneradores.

Es posible conocer qué grado de severidad tiene un fallo a través de considerar cuán a menudo un componente falla y el periodo de tiempo durante el cual el problema persiste.

Son diversos los estudios que hacen alusión a los fallos más severos que ocurren en los aerogeneradores eólicos. En un ejemplo de tales estudios[60], se destaca que uno de los componentes más críticos del aerogenerador es la multiplicadora, siendo responsable de alrededor del 15-20% de los costes de mantenimiento y de los tiempos de interrupción por fallo.

Cabe destacar el profundo análisis llevado a cabo en aerogeneradores instalados en Finlandia, Suecia y Alemania [57], con el objetivo de identificar cuáles son los componentes más críticos de los equipos eólicos, así como las principales áreas en las que se deben centrar los esfuerzos a la hora de realizar la planificación del mantenimiento. Dicho análisis arrojó:

- Un aerogenerador eólico promedio puede necesitar ser atendido por reparación entre 0,64 y 2,38 veces por año.
- El tiempo promedio de interrupciones causadas por fallos al año, varía entre 2 y 7 días.
- Los componentes que producen más fallos en el aerogenerador son:
 - Sistema eléctrico.
 - Sensores del sistema hidráulico.
 - Sistema de orientación de la pala o Pitch.
 - Sistema de control.
 - Multiplicadora.
- Los componentes que requirieron mayores tiempos totales de interrupción debido a sus fallos fueron:
 - Multiplicadora.
 - Tren de potencia.
 - Generador.
 - Sistema eléctrico.
 - Sistema de orientación de pala o Pitch.
 - Sistema de control.
 - Sistema hidráulico.
- Los componentes que necesitaron los mayores tiempos promedios de interrupción por fallo fueron:
 - Multiplicadora.
 - Tren de potencia.
 - Generador.
 - Sistema de orientación de pala o Pitch.
 - Sistema de guiñada o Yaw.
 - Estructura.

- La multiplicadora y el tren de potencia son los componentes más críticos del sistema, ya que los tiempos promedio de interrupción que requirieron fueron mayores en relación con otros componentes del aerogenerador.

A modo de comparativa, en la ilustración 23 se comparan la distribución de los fallos y los tiempos de parada para cada uno de los principales componentes del aerogenerador. Este estudio, revela que la mayoría de los fallos están relacionados con el sistema eléctrico, los diferentes sensores, rodamientos y engranajes, el sistema de orientación Pitch de las palas y el sistema de control.

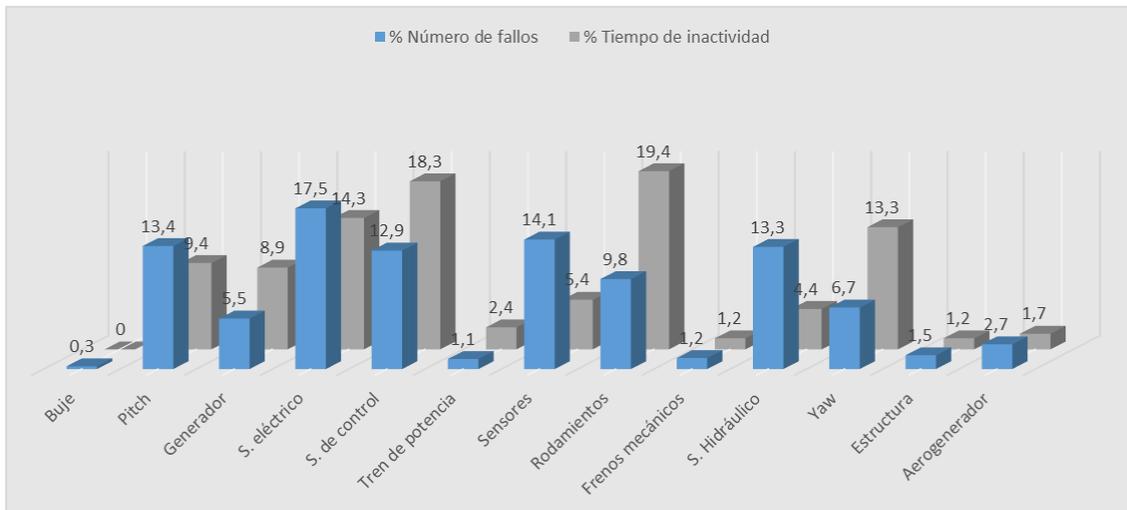


Ilustración 23. Número de fallos en comparación con el tiempo de inactividad por componente para parque eólicos. Elaboración propia en base a [61].

4.2. Sistema de monitorización de la condición para el mantenimiento predictivo en aerogeneradores.

Los métodos y servicios que plantea el nuevo enfoque de mantenimiento predictivo en los parques eólicos se componen de varios tipos de inspección y análisis, los cuales se complementan, consiguiendo evitar graves problemas que, hasta hace no mucho tiempo se producían en los aerogeneradores.

Estas técnicas de mantenimiento predictivo permiten la detección precoz de fallos y averías de los distintos componentes que forman el aerogenerador, mediante su monitorización y diagnóstico continuo. La implementación de este tipo de mantenimiento no se aplica aún de manera generalizada en la mayoría de parques eólicos, como ya se introdujo al principio del análisis.

Por tanto, la monitorización representa en la actualidad una de las innovaciones tecnológicas más importantes a tener en cuenta, ya que permite monitorizar el comportamiento del aerogenerador y controlar múltiples variables de forma continua y automática, a través de sistemas de adquisición de datos de diversos sensores instalados en el aerogenerador, y de la información recibida de los sensores de control del equipo.

No obstante, el principal inconveniente que presenta el mantenimiento predictivo es la necesidad de un tratamiento intensivo de la información recogida de cada aerogenerador y un sistema eficaz de detección de anomalías y diagnóstico de componentes. Esto es así, ya que el volumen de datos necesarios para realizar un plan de mantenimiento predictivo en un parque eólico de unas 30 turbinas supone disponer de un sistema de telecontrol o telemando sumamente potente y adaptado a las condiciones de este tipo de mantenimiento, lo que puede elevar sensiblemente el coste de la instalación eólica.

En cambio, mediante un uso óptimo de este tipo de mantenimiento, es posible modificar los alcances de las gamas de mantenimiento preventivo, consiguiendo la mejora del mismo, así como anticiparse a averías de mayor o menor grado, evitando los inconvenientes que presentan las pérdidas de disponibilidad, producción, operatividad, etc.

Hasta la fecha, en la mayor parte de parques eólicos se ha venido implementando el modelo de mantenimiento preventivo, además del correctivo cuando no queda otra opción, ya que los costes de los medios técnicos necesarios para realizar el mantenimiento predictivo han sido elevados. Sin embargo, en la actualidad dichos medios disponen de fiabilidades más altas y costes de implementación menores, lo que los hace sumamente indicados principalmente para parques eólicos de menor número de aerogeneradores, pero de mayor potencia, debido a los riesgos de mayor valor que estos presentan.

Es por ello, que el escenario actual favorece la implementación del modelo de mantenimiento predictivo. Además, esta situación favorecedora será aún mayor y prácticamente obligará a implantar sistemas de mantenimiento predictivo en los parques eólicos offshore, los cuales presentan costes de mantenimiento que duplican los de los parques terrestres, debidos a la dificultad de intervención de la que disponen

por su lejanía de la costa, a largos periodos de tiempo de acceso prohibido por condiciones climatológicas adversas o a la escasez de medios logísticos disponibles.

En resumen, el mantenimiento convencional de tipo periódico debería sustituirse, como ya se está empezando a hacer, por el predictivo, mucho más en sintonía con los avances tecnológicos de las propias turbinas.

4.2.1. Fundamentos de las técnicas de Condition Monitoring.

A fin de prevenir fallos severos en componentes críticos del aerogenerador como los vistos en el apartado 4.1.2. *Fallos más severos sufridos por los aerogeneradores*, las técnicas de Condition monitoring deben estar basadas en ensayos destructivos y no destructivos [38] [59] [60] [61], siendo las principales técnicas las que se describen a continuación:

- **Análisis de la vibración:** se trata de la tecnología más empleada en CMS, principalmente en los equipos rotativos. El análisis de la vibración es la técnica más óptima para la predicción temprana y la detección de fallas en los equipos mecánicos. La tecnología de sensorización empleada es seleccionada teniendo en cuenta la gama de frecuencias y las condiciones de operación, aunque los dispositivos más empleados son los acelerómetros de distintos tipos. Esta técnica es adecuada principalmente para el control de la multiplicadora, los cojinetes y otros elementos mecánicos del aerogenerador. No obstante, también es posible encontrar técnica de análisis de vibraciones basadas en acelerómetros embebidos en la cimentación de la torre, a fin de controlar su salud estructural. Cabe destacar, que las técnicas de análisis de vibraciones son débiles en la detección de los fallos que se producen en los conjuntos eléctrico y electrónicos del aerogenerador. Por otra parte, las normas de evaluación de vibraciones existentes, como la ISO 10816/2372, ISO IS 3945, ISO IS 7919, son definidas en su mayoría para maquinas que trabajan a carga constante, no ajustándose el aerogenerador estrictamente a este caso, dejando una gran influencia en las señales de vibración tomadas.
- **Análisis del aceite:** el análisis de las partículas de desecho del aceite ha demostrado ser una técnica de CM efectiva para la detección temprana de los daños sufridos por los cojinetes y engranajes de la multiplicadora. Normalmente, el aceite es bombeado en un sistema de circuito cerrado, capturando los desechos metálicos de los componentes rotativos por un filtro. De esta forma, el tipo y la cantidad de residuos metálicos pueden indicar el estado del componente. El análisis del aceite presenta tres propósitos principales, que son: mantener la calidad del aceite, supervisar la condición del mismo y la protección de los componentes que lubrica. Algunas de las pruebas más empleadas en el análisis del aceite son: medida de la viscosidad, grado de oxidación, contenido en agua, contenido de ácido, análisis de conteo de partículas y la temperatura.
- **Medición de temperaturas:** se trata de uno de los métodos más empleados en CM. Facilita la detección de cualquier fallo potencial relacionado con la variación de la temperatura de funcionamiento del equipo. En el aerogenerador, se emplea en su mayoría en componentes como rodamientos, devanados del

generador o líquidos. Los dispositivos empleados en la medición de la temperatura suelen ser termómetros resistentes, pirómetros ópticos y termopares. A diferencia de la termografía, la medición de temperaturas proporciona información sobre el proceso de desgaste continuo del componente por la fricción mecánica excesiva, debida a las propiedades del aceite, rodamientos defectuosos o mal estado de las conexiones eléctricas.

- Emisión acústica: es una técnica basada en la liberación de energía en forma de ondas elásticas transitorias dentro de un material que presenta un proceso de deformación dinámica. Su utilización está enfocada principalmente en la evaluación de la multiplicadora, los rodamientos y la detección de daños en las palas. Su principal inconveniente es su elevado coste, además de que únicamente unos pocos tipos de defectos están presentes en la gama de alta frecuencia.
- Medición de la tensión estructural: orientada al análisis de la calidad estructural del aerogenerador, principalmente utilizada en las palas y la torre. Representa una técnica muy eficiente para la predicción de la vida útil y para la determinación de ciertas deformaciones estructurales.
- Pruebas de ultrasonido: se trata de técnicas muy utilizadas por la industria eólica para analizar estructuralmente las torres y las palas. Son empleadas en su mayoría para la detección y evaluación cualitativa de la superficie y los defectos estructurales.
- Termografía: utilizada a menudo para el monitoreo y la detección de fallos en los componentes electrónicos y eléctricos, ya que los puntos calientes, debido a la degeneración de los componentes o mal contacto se pueden identificar rápidamente.
- Inspección radiográfica: proporciona información relevante sobre la condición estructural, resultando muy eficiente en la detección de grietas y fallos de delaminación en la pala y en el rotor, además de en la estructura de la torre.
- Método de impulsos de choque: utilizado como un método cuantitativo para el monitoreo de la condición de los rodamientos. Basa su análisis en la detección de golpes mecánicos generados cuando una esfera o rodillo en un rodamiento entra en contacto con un área dañada del canal de conducción o con ciertos residuos.
- Inspección visual: sin duda una de las técnicas más antiguas y utilizadas en CM. Está basada en las capacidades sensoriales de la persona, sirviendo como complemento para otro tipo de técnicas de CM. Incluye la audición de sonidos emitidos por el sistema en funcionamiento, tocar (conocer temperatura y vibración) y la inspección visual. Utilizada en el control de componentes como la góndola, las palas o el generador.
- *Performance monitoring*: se trata de la supervisión del rendimiento del aerogenerador, mediante la lectura de parámetros como el factor de capacidad del parque, potencias, velocidades de componentes o velocidad del viento. De esta forma, el operario compara sus lecturas con manuales y especificaciones técnicas del fabricante a fin de determinar si el sistema está funcionando correctamente.

- **Análisis de datos SCADA:** actualmente, en la gran parte de los aerogeneradores modernos es común encontrar sistema de análisis de datos SCADA. Mediante este software, es posible controlar todo el proceso de producción de energía, proporcionando comunicación con los distintos aerogeneradores y controlando el proceso de forma automática desde un ordenador central. De esta forma el SCADA, recopila información de los distintos subsistemas del aerogenerador, a través de sensores. Dicha información, suministra información sobre el estado de funcionamiento de la turbina o mediciones de señales de las condiciones climatológicas, posibilitando conocer eficazmente y en tiempo real la condición del sistema o deducir el estado de los distintos componentes.

4.3. Costes en la industria eólica.

De una manera indirecta, el impulso de la energía eólica como línea empresarial viable por parte de inversores y desarrolladores viene determinada por el riesgo asociado a la confiabilidad de los sistemas. Dicha confiabilidad representa un factor crítico, ya que, si esta disminuye, afecta directamente a la cadena de retorno en concepto de aumento de coste de operación y mantenimiento O&M, reduciendo la disponibilidad de los aerogeneradores para la producción de energía por interrupciones del funcionamiento ocasionadas por la aparición de fallos.

Tal y como se expuso en anteriores apartados, la industria de la energía eólica sigue creciendo de una manera progresiva, impulsada por la fuerte demanda actual de energías no contaminantes. La gestión óptima de los costes de O&M, se presenta como una tarea complicada para el sector, la cual es en numerosas ocasiones olvidada una vez que los equipos se encuentran en operación.

Existe numerosas condiciones de contorno que repercuten en la adecuada gestión de dichos costes, entre las que destacan: la continua necesidad de reducir el LCOE (coste nivelado de la energía), y la variabilidad de las condiciones de operación de parque y su tecnología. A su vez, la situación mundial actual debida al COVID-19, ha propiciado que la industria eólica ponga mucho más énfasis en la precisión de OPEX/CAPEX durante toda la vida útil del parque eólico, siendo el OPEX el costo relacionado con las operaciones y servicios, mientras que el CAPEX representa los gastos e inversiones asociados al bien físico. Por tanto, la fuerte transformación digital que está sufriendo el sector, va orientada a mejorar la gestión de esta nueva realidad, de ahí el interés que suscita la realización de este análisis.

4.3.1. Coste del uso de la energía eólica.

El coste de producción de cada MWh a través de un sistema eólico de generación es dependiente del coste la instalación, la cual debe ser amortizada a lo largo de la vida útil del sistema; del coste de explotación; y de la energía producida, dependiente en gran medida de las condiciones de viento del emplazamiento del parque eólico.

- Costes de inversión de la instalación: dependen directamente del coste de elementos como: aerogeneradores, sistema eléctrico (transformadores, sistema de control, líneas eléctricas), obra civil (cimentaciones, edificaciones, accesos) e ingeniería y dirección. Porcentualmente y de una forma estimada se pueden desglosar en (Ilustración 24):

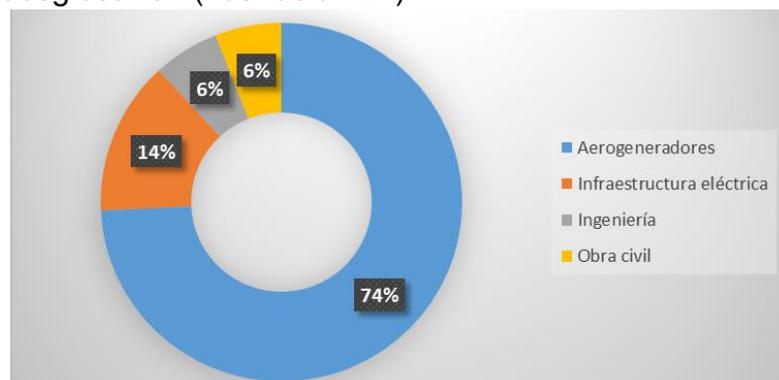


Ilustración 24. Costes de instalación por áreas. Elaboración propia en base a datos [43].

Por otro lado, en el siguiente gráfico (Ilustración 25) se pueden observar en detalle los porcentajes de coste estimados de los distintos componentes que forman la turbina.

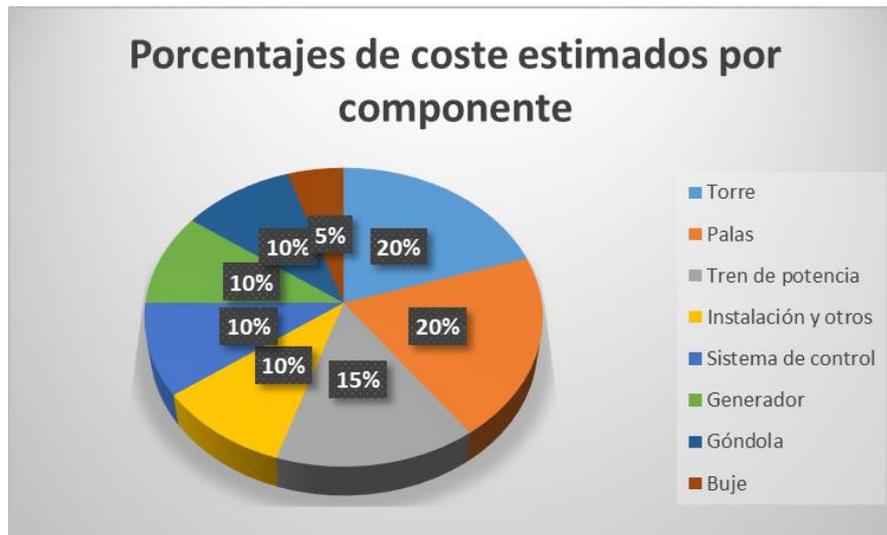


Ilustración 25. Porcentajes de coste estimados por componente. Elaboración propia en base a datos [43].

El tamaño de los aerogeneradores ha aumentado considerablemente en los últimos años, lo que ha llevado consigo una disminución del coste de cada uno de los aerogeneradores. Es por esto, que los costes de generación están directamente relacionados con el tamaño de la instalación y en su mayoría a las condiciones del viento en el emplazamiento del parque eólico.

- Costes de explotación: engloban las actividades ligadas a mantener en funcionamiento el parque eólico en las condiciones óptimas de disponibilidad y gestión económica. En la Tabla 3 se muestran desglosados porcentualmente.

Tabla 3. Costes de explotación generales en proyectos eólicos. Elaboración propia basada en [62].

	Operación y mantenimiento	Terrenos	Seguros e impuestos	Gestión y administración
Coste (%)	57 %	16%	14%	13%

El costo de O&M que soporta un parque eólico se encuentra entre el 50% y el 70% del OPEX, y se debe en su mayoría a las cuantías destinadas a las labores de mantenimiento preventivo y al correctivo. El mantenimiento preventivo suele estar bien definido en las especificaciones técnicas de cada modelo de aerogenerador. En cambio, aunque el mantenimiento correctivo debe estar correctamente limitado por la garantía de disponibilidad en un contrato *full* de O&M, siempre existe una elevada incertidumbre en cuanto a que estos costes puedan ser controlados cuando los equipos van llegando al final de su vida útil y dichos contratos deben ser renegociados. Además, no hay que olvidar, que un contrato *full* siempre lleva asociado un CAP (límite máximo de tipo de interés a cambio de una prima o servicio) del mismo, siendo esta cuantía la que representa el riesgo que se debe gestionar, de ahí la necesidad de la implementación de nuevas tecnologías de gestión para su control.

Por todo esto, para poder controlar los costes de O&M impredecibles y sus incertidumbres asociadas, resulta necesario que los propietarios, los inversores y/o los mantenedores realicen predicciones minuciosas con sus correspondientes incertidumbres asociadas. En este sentido, todo análisis a llevar a cabo debe combinar la información específica del aerogenerador, del parque eólico y la información estadística de una gran base de datos histórica de las instalaciones en cuestión y/o parecidas.

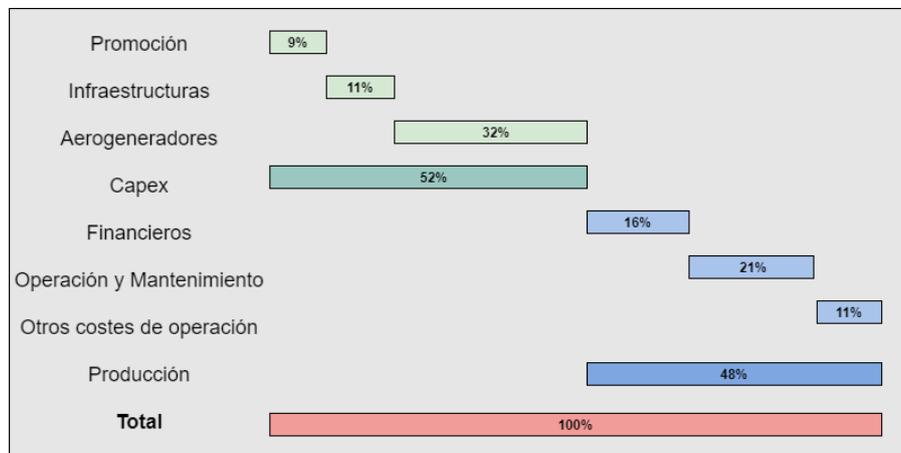


Ilustración 26. Costes generales en el ciclo de vida de un parque eólico. Elaboración propia en base a datos [43].

Resulta fundamental, disponer de un estudio estadístico robusto, que incluya distribuciones que evalúen correctamente las tasas de fallo en los elementos principales. Dichas tasas de fallo producidas en elementos estructurales del aerogenerador, como los ejes, las palas, la torre, la cimentación, etc., son modelizadas mediante análisis de fatiga basados en *digital twins*, simulando las cargas en función de las condiciones de operación del parque eólico en estudio; teniendo siempre la importancia de reducir al máximo la incertidumbre tanto del modelo de simulación como de las condiciones del parque. Por otra parte, en los elementos mecánicos más importantes, como rodamientos, multiplicadora, sistema pitch, yaw y en base a una importante base de datos operativos, se deben combinar los daños debidos a fatiga con otros desgastes ocasionados por la fricción y la correcta alineación elementos, a fin de evitar la aparición de cargas descompensadas.

Por todo esto, a través de la transformación digital de la industria es posible llevar a cabo nuevos métodos, orientados a modelos de mantenimientos más sofisticados y óptimos, no solo asegurando el correcto estado y funcionamiento de los equipos, sino también controlar y predecir con exactitud posibles fallos futuros. No obstante, de una forma objetiva, la industria sabe que disponer de equipos de mantenimiento en el lugar de producción es ineficiente y costoso, siendo sumamente elevados para lugares de instalación remotos. De esta forma, es el momento en el que toman valor todos los nuevos enfoques tecnológicos tratados al comienzo del proyecto, los cuales disponen no solo de capacidades de toma de datos y monitoreo, sino capacidades analíticas robustas que ofrezcan la posibilidad de extraer la mayor información de los datos tomados y transformarlos, a fin de mejorar la toma de decisiones, llevando el activo hasta un nivel de sofisticación en el que sea capaz en la mayoría de las situaciones de autogestionarse.

4.4. Beneficios económicos y operacionales de la implementación de sistemas de monitorización para el mantenimiento predictivo basados en la condición.

Como último punto del análisis comparativo se pretende ofrecer mediante algunos ejemplos una panorámica sobre los beneficios económicos y operacionales de la implementación de sistemas de monitorización para el mantenimiento predictivo de aerogeneradores basados en la condición.

En este punto es importante realizar la siguiente pregunta: ¿La utilidad de la información obtenida mediante los sistemas de monitorización justifica los costes de su instalación y explotación?

Resulta necesario destacar el carácter hermético de la industria eólica en cuanto al ofrecimiento de datos y valores relacionados con el tema en cuestión. La impresión que suscita dicho hermetismo puede dar a entender la inexistencia de estudios completos que ofrezcan garantías fiables acerca de los beneficios de su implementación, así como de casos reales en los que se hayan implementado dichos sistemas en un período de tiempo suficiente como para justificar estos beneficios.

A continuación, se muestran algunos ejemplos sobre la implementación de los sistemas citados anteriormente.

- Aunque se trata de un análisis realizado hace ya varios años, cabe destacar el estudio llevado a cabo sobre la rentabilidad de la aplicación de CMS en aerogeneradores eólicos [63], en el que se describe cómo deben variar la magnitud de las estrategias tradicionales de mantenimiento de modo que la implementación de la monitorización y del mantenimiento basado en la condición sea rentable. En este trabajo se llevó a cabo un análisis del coste de ciclo de vida. El coste total, formado por el coste del ciclo de vida incluyendo los costes adicionales por la implementación de un CMS, es comparado para diferentes alternativas de mantenimiento. Los resultados obtenidos en el estudio fueron:
 - En el caso de un aerogenerador individual promedio de tipo on-shore, para compensar el coste adicional que supone la implementación del CMS, el mantenimiento preventivo debe disminuir un 23%. En el caso de un off-shore esa reducción debe ser del 4,5%.
 - En el caso de un aerogenerador individual promedio de tipo on-shore, para compensar el coste adicional que supone la implementación del CMS, el conjunto de las labores de mantenimiento preventivo y correctivo deben disminuir un 3,5%. Siendo dicha reducción del 2,5% en el caso del parque off-shore estudiado.
 - Para el parque off-shore, un cambio de mantenimiento correctivo a preventivo del 47% es suficiente para hacer rentable la implementación del CMS.
 - La disponibilidad no debe incrementarse en más de un 0,43% para lograr una reducción en el coste por pérdida de producción en una magnitud tal que permita cubrir el coste de la implementación del CMS.

- Proyecto Europeo CMSWind [63]: se trata del desarrollo de un sistema avanzado de monitorización basado en la condición en función de tres técnicas novedosas: análisis de la firma de corriente, análisis modal de operación y técnicas de emisión acústica. Estas técnicas han sido especialmente diseñadas para monitorizar la condición del aerogenerador, la multiplicadora y el eje de alta velocidad (rodamientos incluidos), los cuales son los causantes de alrededor del 53% (según modelo y condiciones de operación) del tiempo de inactividad de un aerogenerador. A través de la implementación de dicho sistema, se pretende incrementar la fiabilidad de estos componentes en un 50%, valor estimado basado en la reducción o incluso eliminación de las labores imprevistas de mantenimiento y paradas innecesarias.

En cuanto a su estrategia de monitorización (Ilustración 27), puesto que las bases de datos extraídas de sistemas de monitorización de aerogeneradores son escasas o incluso inexistentes para algunos tipos de sensores y componentes, CMSWind propone como estrategia la generación de una línea base conocida como “baseline” al principio de la monitorización, que haga la función de punto de referencia para posibilitar la comparación de una situación de no fallo con una de fallo. Además, el sistema permite desarrollar una baseline específica para cada aerogenerador en el que vaya a ser instalada. De esta forma, durante las primeras semanas de la instalación, el sistema realiza el desarrollo de la baseline, y una vez que el sistema tiene datos suficientes para definir las condiciones de contorno aceptables, comienza el proceso de monitorización.

La estrategia de monitorización se basa en la comparación de los nuevos valores tomados con el rango de valores definido por la baseline, de forma que, si los nuevos valores se sitúan dentro del rango aceptable, se considera que el aerogenerador está operando dentro de su funcionamiento nominal. Si esto no fuera así, saltarían alarmas indicando la existencia de un posible fallo.



Ilustración 27. Estrategia de monitorización CMSWind [63].

Poniendo el foco de atención en el impacto económico del proyecto, los fallos en el generador, la multiplicadora y el tren de potencia son los causantes de alrededor del 22% del tiempo total de inactividad de los aerogeneradores, es decir de las paradas no programadas. Los costes de operación y mantenimiento por kW instalado muestran una tendencia decreciente a medida que aumenta el tamaño del aerogenerador, con un límite de indisponibilidad de 3,25 días a 14,7 días por aerogenerador al año, aplicando estándares de fallo registrados. Por otra parte, la producción de electricidad para un factor de

capacidad del 50% en turbinas de 2, 4 y 6 MW según dicho escenario está comprendida entre valores de 260 k€/375 k€, 892 k€/1.286 k€ y 1.231 k€/1.773 k€ respectivamente. A su vez, el aumento de la disponibilidad en 5% al año, lo cual representa 18 días de producción, se traduce en 11 k€ a 73 k€ de ingresos adicionales. En vista de estos resultados, es posible concluir que un operador de aerogenerador eólico supondría una pérdida de entre 12.200 € y 42.600 € para un solo fallo, lo que significa una disminución del 5% del tiempo de operación por año. Cabe destacar, que estas cifras solamente tienen en cuenta las pérdidas en términos de generación de energía, de forma que otros gastos mayores relacionados con los consumible y el personal necesario para el mantenimiento deben ser determinante de manera similar. Considerando el peor de los casos, es posible estimar que un operador de parque eólico, tendrá un coste de 2000€ mensuales en el caso de un fallo anual, generando una pérdida del 5% del tiempo de operación, tal y como de cito anteriormente. CMSWind tiene como objetivo aumentar la fiabilidad de la multiplicadora, el generador y el tren de potencia en torno al 50%, lo que supondría una disminución de los tiempos totales de parada de los aerogeneradores de 0,5 a 2 días, es decir, un ahorro de las pérdidas asociadas de entre 1.400 € y 5.000 €.

- Estudio del impacto que suponen las innovaciones en Operación y Mantenimiento de parques eólicos según BVG Associates [64]: Según el análisis de BVG Associates se espera que las innovaciones en los sistemas de operación y mantenimiento supongan una reducción de alrededor del 1% del coste de generación de energía (LCOE) para proyectos eólicos entre 2014 y 2025. Dicho impacto económico se detalla en los siguientes gráficos (Ilustraciones 28 y 29), diferenciado aerogeneradores de pequeño y gran tamaño.



Ilustración 28. Impacto potencial sobre el ahorro de costes en un parque eólico relativo a las innovaciones en OyM [64].

Innovation	Maximum Technical Potential Impact				Anticipated impact FID 2025			
	CAPEX	OPEX	AEP	LCOE	CAPEX	OPEX	AEP	LCOE
Low Wind								
Improvements in weather forecasting	0.0%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
Improvements in inventory management	0.0%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%
Optimisation of blade inspection and repair	0.0%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%
Introduction of turbine condition-based maintenance	-0.2%	2.1%	0.2%	0.5%	0.0%	0.5%	0.0%	0.1%
Introduction of wind farm wide control strategies	-0.3%	0.5%	0.5%	0.4%	-0.2%	0.3%	0.3%	0.2%
Improvements to wind farm condition monitoring	-0.1%	1.1%	0.1%	0.3%	0.0%	0.8%	0.1%	0.2%
Introduction of holistic asset management strategies	0.0%	1.8%	0.1%	0.5%	0.0%	1.0%	0.1%	0.3%
High Wind								
Improvements in weather forecasting	0.0%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%
Improvements in inventory management	0.0%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%
Optimisation of blade inspection and repair	0.0%	0.3%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%
Introduction of turbine condition-based maintenance	-0.2%	2.2%	0.2%	0.6%	0.0%	0.5%	0.0%	0.1%
Introduction of wind farm wide control strategies	-0.3%	0.6%	0.5%	0.4%	-0.2%	0.3%	0.3%	0.3%
Improvements to wind farm condition monitoring	-0.1%	1.1%	0.1%	0.3%	0.0%	0.8%	0.1%	0.2%
Introduction of holistic asset management strategies	0.0%	1.9%	0.1%	0.6%	0.0%	1.1%	0.1%	0.3%

Ilustración 29. Impacto potencial sobre el ahorro de costes en un parque eólico asociados a las innovaciones en OyM [64].

Como se puede observar en las ilustraciones anteriores dicho impacto sobre el ahorro de costes se fundamenta en 7 líneas principales de innovación, siendo

las innovaciones de interés para este análisis las relacionadas con las mejoras en el mantenimiento basado en la condición y la monitorización de los aerogeneradores.

Introducción del mantenimiento basado en la condición:

- Práctica actual: una vez concluido el período de garantías del fabricante, los propietarios de parques eólicos son los responsables de asumir el riesgo del mantenimiento y operación de los parques, motivo por el cual resulta necesario la implementación de mejoras en los mantenimientos preventivos de los equipos, de esta forma se adoptan estrategias de mantenimiento basadas en la condición antes de que lleguen a producirse las averías.
- Innovaciones: nuevos sistemas de diagnóstico, monitorización, detección de fallos que han sido utilizados en otros sectores, se están empezando a implementar en el sector eólico. Tener conocimiento del estado real de los equipos, detectar un mal funcionamiento y poder estimar el tiempo de vida útil, ayudará al explotador del parque a gestionar de una manera más óptima los planes y estrategias de mantenimiento preventivo e incluir en estos las reparaciones necesarias atendiendo siempre al estado real del equipo.

Mejoras en los sistemas de monitorización de la condición del parque eólico:

- Práctica actual: actualmente, los equipos incluyen sistemas de medición de vibraciones, siendo el propio fabricante del aerogenerador el encargado de recoger la información obtenida y analizarla. Es por esto, que para el explotador del parque resulta muy complicado acceder a los resultados obtenidos del análisis de dicha información.
- Innovaciones: la industria se encuentra en el proceso de implementación de nuevas técnicas de monitorización de vibraciones, como de monitorización de la condición del equipo en general, por ejemplo, es posible incluir sistemas de vibraciones más simples, ya que estos sistemas no almacenan el espectro completo de las vibraciones, sino que analizan unas frecuencias determinadas en las que suele ser posible detectar los principales fallos. Con este tipo de sistemas se reduce el coste de los equipos de medición de vibraciones convencionales.

De acuerdo con las cifras que ofrece BVG Associates, esta tecnología podría alcanzar ahorros de hasta el 2,1% en OPEX, un aumento de la energía generada del 0,2% y una reducción de los costes generadores de producción de energía del 0,5% (LCOE), por tanto, el ahorro global alcanza el 2,8%, un 0,6% estimado en el escenario 2025 ya que se trata de una tecnología en fase de desarrollo.

CAPÍTULO 5. CASO DE ESTUDIO. PROPUESTA DE APLICACIÓN EN UN PARQUE EÓLICO TIPO.

Los aerogeneradores eólicos son una fuente de energía renovable cada vez más utilizada a nivel mundial, resultando hoy en día indispensable en el mix energético de muchos países. Además, es cierto que desde un punto de vista general cuentan con una tecnología bastante madura, aunque abierta a la mejora y necesitada de innovaciones.

Como ya se dijo en el capítulo anterior, a los aerogeneradores diseñados durante la primera década del siglo 21, los cuales actualmente tienen entre 15 y 20 años, se les fue determinada una vida útil de diseño de 20 años, generalizada por la mayoría de fabricantes. Dicha vida útil fue determinada en función de parámetros técnicos como la fatiga y el desgaste a la que se ven sometidos los diversos componentes que forman el aerogenerador, producidos por las cargas derivadas del propio funcionamiento del mismo, así como a las condiciones climatológicas adversas en los lugares de instalación de los parques eólicos. Estos lugares son abiertos, a la intemperie, sujetos a cambios de presión y temperatura, y a la acción de la lluvia, la nieve, el hielo, la humedad y hasta las partículas de arena que transporta el viento que los hace girar.

El viento, la propia fuente de energía, puede ser en ocasiones el mayor riesgo debido a su intensidad y dirección cambiantes. Es por esto que la intensidad con la que el viento incide sobre los aerogeneradores es una de las principales variables a tener en cuenta para determinar la vida útil de la turbina. No obstante, como se dijo anteriormente los aerogeneradores están diseñados para unas condiciones generales de viento y operación, que en realidad en la mayoría de los casos son menos exigentes de lo esperado, por lo que es muy probable que después de los 20 años previstos tanto las estructuras como los componentes no hayan consumido aun toda su vida útil. Por lo tanto, el control del viento es impredecible a medio plazo y supone un verdadero reto, ya sea para maximizar su aprovechamiento como para realizar unas labores de mantenimiento de los equipos que forman los aerogeneradores lo más eficaces y económicas posibles.

Atendiendo a la problemática actual que sufre la industria eólica mostrada al inicio del Capítulo 4 acerca de la acusada antigüedad del parque eólico español, en el cual más de la mitad de los aerogeneradores instalados tienen 15 años o más (ver Ilustración 20), resulta de gran interés el caso de estudio propuesto.

Es por esto que el interés radica en extender la vida útil de los aerogeneradores que se encuentran en la situación anterior. De esta forma, mediante el siguiente caso de estudio propuesto se pretende valorar y proponer las posibilidades que existen en cuanto a esta situación.

Obviando las labores de operación y mantenimiento de tipo correctivo y preventivo que se vienen aplicando en este tipo de aerogeneradores, también incluso en equipos con tecnología moderna, sin duda el futuro de la gestión de los parques eólicos va encaminado a la implementación de estrategias basadas en análisis predictivos mediante herramientas de *Condition Monitoring* fundamentadas en la aplicación de

soluciones tecnológicas como el *BigData*, SCADA o inteligencia artificial, presentadas anteriormente.

No obstante, cabe destacar que en la actualidad los nuevos modelos de aerogeneradores que se están instalando ya empiezan a estar dotados de sistemas de control inteligente más sofisticados o por lo menos ciertas empresas los ofertan para su implementación en ellos, aunque es posible decir que estas estrategias se encuentran aún en fase de desarrollo (ver punto 4.4.), por lo que su instalación no es ni mucho menos generalizada.

El modelo de aerogeneradores del parque eólico tipo en el que se basará el caso de estudio y el cual ha sido elegido en base a que se trata de uno de los modelos de mayor aplicación (4.000 MW operativos en más de 15 países [65]) y que más se ajusta a las características de la propuesta de aplicación del caso de estudio de este trabajo, presenta las siguientes características básicas [66]:

- Aerogeneradores: 33 turbinas modelo Nordex-Acciona Windpower de 1,5 MW de potencia nominal y 77 metros de diámetro de rotor (AW77/1500) del fabricante Acciona Energía. Número de palas: 3. Velocidad mínima, nominal y máxima: 3,5 m/s - 11,1 m/s - 25 m/s respectivamente.
- Potencia total del parque: 49,5 MW.
- Torre: acero de 80 m de altura.
- Puesta en marcha: año 2006 (15 años de antigüedad).
- Parque eólico terrestre.

Este tipo de aerogeneradores cuenta opcionalmente con un sistema básico de monitorización en continuo para el mantenimiento predictivo, pero que únicamente cuenta con sensorización para la medición de vibraciones en la multiplicadora, en el eje principal y en los rodamientos del generador, además del control de la temperatura en la etapa de salida y el cárter de la multiplicadora, así como el análisis de partículas metálicas en el aceite de la misma y su envejecimiento.

A su vez, cuenta con algunos sistemas de regulación y control de la velocidad de giro, producción de energía, horas de funcionamiento y toma de datos medioambientales (meteorológicos y velocidad del viento).

Todos estos sistemas básicos de monitorización, regulación y control, a medida que el aerogenerador va acercándose a su vida útil de diseño comienzan a sufrir fallos y errores en las mediciones tomadas, con el consiguiente perjuicio económico que supone que el aerogenerador pierda disponibilidad de producción eléctrica debido al fallo de estos sistemas. Además, la degradación de la imagen comercial del fabricante y la disminución de la seguridad que conlleva que los sistemas de control del aerogenerador no se encuentren al 100% de operatividad, son factores a tener muy en cuenta.

Una vez llegados a este punto, entorno a los 15 años de funcionamiento del aerogenerador, es el momento de barajar las posibilidades existentes.

5.1. Opción 1: operación hasta agotar la vida útil.

La opción más “fácil” y que no requiere de ninguna inversión adicional sería operar con el aerogenerador hasta agotar su vida útil, llevando a cabo las acciones de operación y mantenimiento convencionales, siempre y cuando siga existiendo suministro de repuestos. En caso contrario, no quedará otra opción que el desmantelamiento. Cabe destacar, que a medida que el aerogenerador vaya envejeciendo y sobrepase su vida útil, los costes derivados de la operación y mantenimiento serán cada vez más elevados, y los ingresos percibidos por la venta de la energía producida disminuirán, ya que la disponibilidad del aerogenerador se verá mermada a causa de paradas por fallos.

Esta opción es actualmente la más implementada hasta alcanzar unos 25 años de funcionamiento del aerogenerador, asumiendo el elevado incremento de costes que conlleva. El desmantelamiento se produce cuando resulta inviable la continuidad en la operación de los aerogeneradores.

5.2. Opción 2: repotenciación.

Como ya se indicó anteriormente (ver Tabla 2), la repotenciación de parques eólicos es la opción implementada actualmente en casos de parques con una disponibilidad muy baja, que no disponen de repuestos en casos de avería y con una obsolescencia tecnológica insalvable operacional y económicamente.

Por esto, aunque se debe tener en cuenta esta opción se considera que, en caso de un parque eólico de estas características, que cuenta con la posibilidad de doblar su vida útil no es la opción más acertada.

5.3. Opción 3: extensión de vida útil.

La última alternativa existente es instalar un sistema moderno de sensorización y monitorización, con el objetivo de extender la vida útil del aerogenerador hasta los 30 años. A la hora de considerar esta opción resulta imprescindible disponer de garantías por parte del fabricante en el suministro de repuestos durante dicho período de tiempo.

En base al análisis realizado en el Capítulo 4 acerca de las distintas metodologías y alternativas existentes o en desarrollo, para llevar a cabo nuevas estrategias en la operación y mantenimiento de aerogeneradores, parece claro que la implementación de un sistema de *Condition Monitoring* apoyado por soluciones tecnológicas como el *BigData* y la inteligencia artificial es la mejor opción para lograr la extensión de vida útil.

De esta forma, mediante un ordenador central se monitorizan continuamente las condiciones de operación de los aerogeneradores del parque. Como ya se expuso, si el sistema detecta alguna anomalía en los valores medidos en relación a las variables registradas, si así se ha programado, la turbina se parará automáticamente y transmitirá una alarma a través de comunicación online. Además, a través de una red

informática interna, se volcarán todos los datos proporcionados por el sistema de monitorización de la condición y los sensores ambientales a un SCADA.

El SCADA permitirá una gestión y control del sistema local o remoto más óptimos, logrando la interconexión con los distintos dispositivos de campo, actuadores, transductores e instrumentos implementados en los aerogeneradores.

Es importante destacar que la dimensión de los sistemas de monitorización y control que serían de aplicación en el caso de extensión de vida útil, sería inferior al sistema completo de aplicación en un aerogenerador moderno de nueva instalación. Esto es debido a que un aerogenerador del tipo AW77/1500 pese a que se encuentre con la necesidad de extender su vida útil, no requiere de la misma intensidad de control que un aerogenerador de última generación que dispone de elementos más complejos y sofisticados que deben ser controlados con más profundidad.

Por tanto, en base a las posibilidades de monitorización existente en la actualidad vista en el capítulo anterior y a los fallos más recurrentes sufridos por aerogeneradores, un sistema adecuado para la extensión de vida útil de un parque eólico de características similares al modelo tipo presentado líneas atrás podría estar formado por:

- Sistema de monitorización de la condición que realice mediciones y análisis de:
 - Análisis vibratorios mediante acelerómetros en la multiplicadora, en los ejes delantero y trasero, en los distintos rodamientos de acoplamiento de los ejes, en el buje y en los sistemas de orientación *Yaw* y *Pitch*.
 - Análisis de las partículas de desecho del aceite de la multiplicadora.
 - Medición de la temperatura del aceite de la multiplicadora, de los devanados del generador, de los rodamientos principales, de conexiones eléctricas y electrónicas y de los líquidos del sistema de refrigeración.
 - Medición de la tensión estructural mediante acelerómetros y galgas extensiométricas en las palas, en la torre y embebidos en la cimentación.
 - Termografía en situaciones de sospecha de fallos en conexiones eléctricas y electrónicas.
- Sistema de control meteorológico convencional.
- *Performance monitoring*: supervisión continua del rendimiento del aerogenerador mediante la lectura y comparativa de parámetros de funcionamiento.
- Análisis de datos SCADA: como herramienta de gestión de los datos generados por los sensores instalados.

El sistema instalado informará de las necesidades de mantenimiento anticipándose en la medida de lo posible a la ocurrencia de un fallo y por tanto de la parada del aerogenerador. El desarrollo de las tareas de mantenimiento predictivo basado en la condición lleva consigo un coste asociado, a lo que se debe añadir el coste derivado de los equipos sensores, comunicadores, registradores y procesadores, así como el coste de la instalación de todos ellos en cada uno de los aerogeneradores del parque y su centro de control.

El conocimiento exacto de los costes citados se encuentra fuera del alcance de conocimiento del autor del trabajo, ya que además de referirse a estrategias y sistemas en desarrollo o con la justa implementación industrial, la posibilidad de obtención de valores y datos certeros de lo existente no ha sido posible.

No obstante, es posible llevar a cabo la siguiente reflexión: parece lógico pensar que si un parque eólico del tipo expuesto (formado por sistemas de control básicos de fábrica), consigue amortizarse en los primeros 15 años de operación (dependiendo ligeramente de algunos factores como la producción eléctrica y el precio de venta de la energía) y mediante la implementación de los sistemas propuestos es posible aumentar su operatividad y por tanto la producción de energía hasta los 30 años, pueda ser viable económicamente la implementación de la propuesta de extensión de vida.

Además, se debe tener en cuenta los costes de inversión (Ilustración 24) y operación (Tabla 3) expuestos en el capítulo anterior.

Los gastos de operación de un parque eólico son muy reducidos durante los tres primeros años de funcionamiento de un parque eólico, ya que los aerogeneradores se encuentran en garantía y las tareas de mantenimiento no suponen coste alguno. Una vez que termina este periodo, los gastos de operación suponen el 21% de los ingresos totales por la venta de la energía producida. De ese 21%, los gastos de operación y mantenimiento suponen el 57%, lo que evidencia la importancia de la reducción de estos costes en la viabilidad económica de un parque eólico y más de cara a la extensión de su vida útil.

En cuanto a la inversión inicial para la puesta en marcha de un parque eólico, se debe tener en cuenta que solo los aerogeneradores suponen el 74% de dicha inversión (con un coste unitario para el modelo AW77/1500 de alrededor de 1.500.000 €), dato que afianza la necesidad en la mejora de la gestión de estos parques.

Por último y a modo de ejemplo final, para poner en valor la propuesta realizada, en un estudio realizado por el departamento de energía de EEUU [67], los autores estiman los beneficios de la aplicación del mantenimiento predictivo en la industria eólica en:

- 65 - 75% de eliminación en número de paradas debido a fallo en los equipos.
- 35 - 45% de reducción de tiempos improductivos no planificados.
- 15 - 25% de reducción de costes de personal de mantenimiento.
- 15 - 25% de reducción de pérdidas de producción relacionadas con labores de mantenimiento.

Por tanto, parece obvio que la opción de extensión de vida de los aerogeneradores hasta un objetivo de 30 años de operación mediante la aplicación de sistemas inteligentes de sensorización y monitorización para el mantenimiento predictivo es la opción más acertada. No obstante, resulta indispensable a la hora de implementar dichos sistemas, que la planificación de la instalación se realice a tiempo (antes de agotar su vida útil), de forma que la inversión realizada aporte viabilidad al proyecto.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

Actualmente, la sociedad se encuentra inmersa en un claro proceso de adaptación y cambio orientado en la digitalización, en el desarrollo de nuevas metodologías de control y gestión de los recursos e infraestructuras de uso general. Ya no resulta tan primordial la ejecución de nuevas construcciones, sistemas o infraestructuras, siendo ahora una de las principales vías de desarrollo la extensión de la vida útil y el cuidado de dichas infraestructuras, así como la optimización de los procesos de operación, gestión y mantenimiento.

A lo largo del desarrollo de este trabajo y para poder disponer de una visión global de los distintos enfoques existentes hoy en día, ha sido necesario comenzar desde un punto de vista general y amplio, centrado en el estado del arte actual de las infraestructuras inteligentes.

Ha quedado claro que el concepto de infraestructura inteligente engloba y relaciona a su vez múltiples aspectos, ya sean sociales, tecnológicos o ingenieriles.

Particularmente, la industria eólica requiere de cambios respecto a los métodos utilizados en el mantenimiento de sus equipos, ya que como se ha visto gran parte del parque eólico principalmente a nivel nacional, está llegando al final de su vida útil, por lo que resulta necesario desarrollar estrategias para garantizar la competitividad de la energía eólica, debiendo de ir orientadas en la implementación de nuevos sistemas tecnológicos, y en consonancia con el resto de sectores productivos.

A través de la implementación de sistemas de monitorización basado en la condición, los operadores de los parques eólicos pueden conocer el estado real de los principales componentes de los aerogeneradores en tiempo real, optimizando así el coste de operación y la efectividad del mantenimiento. La aplicación de estas técnicas implica inversiones económicas iniciales fuertes, no obstante, dichas inversiones son compensadas por los beneficios de producción continua de energía, por tiempos de parada mínimos y más disponibilidad, para una planificación temprana de las labores de mantenimiento y reparación de averías

Una vez concluido el TFM y poniendo atención en los antecedentes del análisis, es posible afirmar que la industria eólica en particular, al igual que otros campos de la ingeniería, requiere de la implementación de nuevos sistemas de control y monitorización de sus equipos, a fin de optimizar los procesos de gestión, operación y mantenimiento de los parques eólicos. Además, atendiendo al problema de extensión de vida útil que presenta la industria, así como a los elevados costes de OyM y a la repercusión operacional y económica que supone aumentar la fiabilidad de los equipos y su disponibilidad para la producción de energía eléctrica, se ha podido contrastar la importancia que supone el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías de monitorización basadas en la condición del aerogenerador.

Atendiendo a todo lo anterior, y con el objetivo de mostrar un ejemplo de aplicación en un parque eólico que se encuentre en operación y requiera de la toma de decisiones en cuanto al escenario de finalización de su vida útil, las distintas alternativas existentes se han puesto de manifiesto en el último capítulo del trabajo. De esta forma, y a través de algunos ejemplos y reflexiones es posible concluir que la

estrategia de extensión de vida de los parques eólicos cercanos a agotar su vida útil de diseño, es una apuesta beneficiosa tanto operacional como económicamente y que debería tenerse muy en cuenta a la hora de planificar la gestión y el futuro de este tipo de emplazamientos.

No obstante, resulta fundamental destacar las dificultades encontradas a la hora de encontrar datos económicos reales en relación a la industria eólica, principalmente sobrecostos producidos por fallos en las turbinas y que hubieran sido de interés para poder afinar y profundizar más en el análisis.

Dada la importancia que tiene la energía eólica tanto en España como en el mundo, generadora de un elevadísimo cupo de la energía consumida y las expectativas de crecimiento para los próximos años, es crucial desarrollar y poner en valor los distintos enfoques desarrollados en este trabajo.

Por último, en función de las conclusiones realizadas es posible considerar que se han cumplido los objetivos de análisis fijados al inicio del trabajo.

Líneas futuras.

Como posibles líneas futuras de continuación de este trabajo, sería de gran interés el desarrollo de un análisis de aplicación real a nivel de campo una vez que los sistemas de monitorización estudiados se encuentren en un estado de desarrollo tecnológico maduro, momento en el cuál será posible disponer de bases de datos robustas, que ofrezcan indicadores claros de los beneficios que aporta su implementación.

A su vez, también sería de gran interés conseguir el desarrollo, la normalización y estandarización de un sistema de monitorización, de bajo coste y con un carácter versátil, que ofrezca las distintas posibilidades de monitorización que pueden ser implementadas en un aerogenerador eólico, ofreciendo distintos niveles de sensorización y capacidad de adaptación a equipos de distintas potencias y características que se encuentra ya en operación.

Consideraciones adicionales.

Como consideraciones adicionales es posible destacar que mediante la realización de este trabajo se ha logrado obtener por parte del autor gran variedad de conocimientos y competencias transversales en diversos campos que engloba la ingeniería.

Además, se ha podido poner en práctica y en valor lo aprendido a lo largo de los estudios superiores de Ingeniería Industrial, así como enriquecer y elevar las capacidades analíticas y de síntesis.

Todo esto, aporta importantes beneficios de cara a desarrollar la vida laboral, logrando disponer de una visión y un conocimiento de lo que ocurre y de los desafíos que se presentan en el futuro.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Comisión de ciencia y tecnología para el desarrollo., “Ciudades e infraestructuras inteligentes.” *Nac. Unidas, Cons. económico y Soc.*, vol. 03074, pp. 3–4, 2016.
- [2] International Telecommunication Union, “Smart sustainable cities: An analysis of definitions, Focus Group Technical Report,” 2014, [Online]. Available: <http://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/ssc/Pages/%0Adefault.aspx>.
- [3] R. E. Hall, B. Bowerman, J. Braverman, J. Taylor, and H. Todosow, “The vision of a smart city,” *2nd Int. Life ...*, vol. 28, p. 7, 2000, [Online]. Available: ftp://24.139.223.85/Public/Tesis_2011/Paper_Correction_4-15-09/smartycitypaperpdf.pdf.
- [4] M. A. DIRKS, S., KEELING, “Vision of Smarter Cities: How Cities Can Lead the Way into a Prosperous and Sustainable Future,” *IBM Inst. Bus. Value*, 2009.
- [5] E. GIFFINGER, R., FERTNER, C., KRAMAR, H., KALASEK, R., PICHLER-MILANOVIC, N., MEIJERS, “Smart Cities: Ranking of European Medium-Sized Cities. Vienna University of Technology.” 2007.
- [6] European Commission, “Mapping Smart Cities in the EU,” 2014.
- [7] E. Ontiveros, D. Vizcaíno, and V. López Sabater, *Las ciudades del futuro: inteligentes, digitales y sostenible*. 2017.
- [8] Ayuntamiento de Santander, “Santander Smart City Plan Director de Innovación,” *Santander.Es*, pp. 1–132, 2010, [Online]. Available: <http://santander.es/servicios-ciudadano/areas-tematicas/innovacion/plan-director-de-innovacion>.
- [9] Indra, “Smart Government (SG): Plataforma para gestionar los servicios públicos de los ciudadanos de forma personalizada y fomentar la interacción.” <https://www.indracompany.com/es/indra/smart-government-sg-plataforma-gestionar-servicios-publicos-ciudadanos-personalizada-fomentar> (accessed Apr. 15, 2021).
- [10] T. Kuhn, *The structure of scientific revolutions*. Chicago and London: The University of Chicago Press, 2017.
- [11] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum, 2016.
- [12] R. Csalodi, S. Jaskó, Z. Süle, and T. Holczinger, “Industry 4.0 - Driven Development of Optimization Algorithms: A Systematic Overview,” *Complexity*, no. February, pp. 0–22, 2021, doi: 10.1155/2021/6621235.
- [13] European Commission, *Industry 5.0. Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. 2021.
- [14] Eurostat, “Final consumption expenditure of households by consumption purpose.” https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NAMA_10_CO3_P3__custom_277137/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=0e65567e-200b-455e-8df9-26e05dfe689e.
- [15] S. Atkinson, S. Fuller, and J. Painter, Eds., *Wellbeing and place*. Ashgate, 2012.

- [16] European Commission, “The European Green Deal,” *COM(2019) 640 Final*, p. 24, 2019, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [17] European Commission, “COM(2020) 662 final. A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creative jobs, improving lives.” p. 27, 2020.
- [18] European Commission, “EU’s Next Long-Term Budget & NextGenerationEU: Key Facts & Figures,” no. November. p. 3, 2020.
- [19] European Commission, “Draft proposal for a European Partnerships under Horizon Europe. Built4People: People-centric sustainable built environment,” no. June. p. 62, 2020.
- [20] “buildingSMART.” .
- [21] United Nations, “Smart cities and infrastructure,” 2016.
- [22] “Sistemas y Estructuras inteligentes.” Industriales, ETSII, UPM, 2020.
- [23] M. A. y M. A. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, “*Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications*,” IEEE Commu. 2015.
- [24] “Soluciones tecnológicas.” <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/smart-sustainable-cities.aspx> (accessed Apr. 06, 2021).
- [25] “SAS Institute.” https://www.sas.com/es_es/insights/analytics/what-is-artificial-intelligence.html#history.
- [26] A. L. Loría-García, E. M. Villalobos-Granados, and C. Piedra-Santamaría, “Modelo de toma de decisiones de mantenimiento basado en la predicción de vida útil para componentes de sistemas eólicos en Costa Rica,” *Rev. Technol. en Marcha*, vol. 30, no. 3, p. 129, 2017, doi: 10.18845/tm.v30i3.3279.
- [27] “PowerData.” <https://www.powerdata.es> (accessed Apr. 05, 2021).
- [28] AECOC - Asociación de Fabricantes y Distribuidores, “¿Qué son los Digital Twins y por qué son tan importantes?” <https://www.aecoc.es/innovation-hub-noticias/que-son-los-digital-twins-y-por-que-son-tan-importantes/> (accessed Apr. 13, 2021).
- [29] TWI, “Digital Twin Technology.” <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-digital-twin> (accessed Apr. 13, 2021).
- [30] “Iberdrola innovación.” <https://www.iberdrola.com/innovacion/machine-learning-aprendizaje-automatico> (accessed Apr. 07, 2021).
- [31] E. Pérez-López, “Los sistemas SCADA en la automatización industrial,” *Rev. Technol. en Marcha*, vol. 28, no. 4, p. 3, 2015, doi: 10.18845/tm.v28i4.2438.
- [32] W. K. Farrar CR, “An introduction to structural health monitoring.” pp. 365(1851):303–15, doi: 10.1098/rsta.2006.1928.
- [33] P. T. J. D. Causado-Bulevas, N. D. Gómez-Cardona, E. González-Valencia, D. Jessie, “Applications Of Fiber Bragg Gratings Sensors In Civil Structures,” *Revista Colombiana de Física*, Vol. 43, No. 3, 2011.
- [34] J. D. J.-V. et al R. Fernandez, N. Gutierrez, H. Jimenez, F. Martin, L. Rubio, *On the Structural Testing Monitoring of CFRP Cockpit and Concrete/CFRP Pillar by*

FBG Sensors, Adv. Eng. Mater. 18. 2016.

- [35] M. Arenas Mas, “Diseño e implementación de un sistema de adquisición de aceleraciones con procesamiento mediante microcontrolador.” Capítulo 4: Sensor medidor de aceleración. *Acelerómetro*, Universidad de Sevilla, pp. 39–54, 2008.
- [36] “Acelerómetro, sensor de movimiento o vibración,” 2017. <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/acelerometro/> (accessed Apr. 25, 2021).
- [37] “SCI Control & Inspeccion.” <https://scisa.es/termografia/> (accessed Apr. 20, 2021).
- [38] “GEISA.” <https://geisa.com.do/inspecciones-termograficas/> (accessed Apr. 20, 2021).
- [39] M. B. M. Abella, “Mantenimiento industrial.” Área de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid., [Online]. Available: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/lecturas/MantenimientoIndustrial.pdf>.
- [40] A. F. M. Aziz, H. Noura, “General review of fault diagnostic in wind turbines.” in *Control & Automation (MED)*, 18th Mediterranean Conference on, Marrakech, Morocco., pp. 1302–1307, 2010.
- [41] C. S. Z. Hameed, Y. Hong, Y. Cho, S. Ahn, “Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 13, pp. 1–39, 2009.
- [42] M J . Neale and B.J. Woodley, “Condition Monitoring Methods and Economics,” *Bruel & Kjaer*, 1978, [Online]. Available: <http://www.bksv.es/doc/16-054.pdf>.
- [43] “Asociación Empresarial Eólica.” <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana> (accessed Jun. 15, 2021).
- [44] “Global Wind Report 2021.” Accessed: May 17, 2021. [Online]. Available: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>.
- [45] AEE (Asociación Empresarial Eólica), “Elementos Clave Y Propuestas Para El Desarrollo De La Eólica Marina En España,” p. 31, 2019, [Online]. Available: <https://www.aeeolica.org/images/Posicionamientos/Elementos-clave-para-eolica-marinaDIC2019.pdf>.
- [46] “Offshore Wind Outlook 2019.” IEA - Agencia Internacional de la Energía.
- [47] “Floating offshore wind energy A policy blueprint for Europe.” Wind Europe 2018.
- [48] D. T. Aw, “DESCRIPCIÓN TÉCNICA AW3000,” 2016.
- [49] World Energy Trade, “5 componentes cruciales para reducir las fallas en turbinas eólicas en tierra.” <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/5-componentes-cruciales-para-reducir-las-fallas-en-turbinas-eolicas-en-tierra> (accessed May 10, 2021).
- [50] “UL- DEWI RENEWABLES.” <https://aws-dewi.ul.com/>.
- [51] J. R. R. S. F. E. H. Montero, M. L. R. Barrios and and L. J. d. M. A. R. Naranjo, S.Gerges, “Monitoreo por condición a aplicar en parques de turbinas eólicas.”

- Revista de Ciencia y Tecnología, pp. 17–24, 2011.
- [52] S. Pryor and R. Barthelmie, “Assessing the vulnerability of wind energy to climate change and extreme events,” *Climate Ch.* 2013.
- [53] C. WALFORD, “Wind Turbine Reliability: Understanding and Minimizing Wind Turbine Operation and Maintenance Costs,” 2006.
- [54] et al CASELITZ, P., “On-line fault detection and prediction in wind energy converters.” Proceedings of the EWEC’94, Thessaloniki, 1994.
- [55] L. A. y T. D. J. M. Gonzáles, “Modelo de criticidad operacional en generadores de parques eólicos.” presentado en XII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Zaragoza, España, pp. 2331–2340, 2008.
- [56] S. Pourmohammad y A. Fekih, “Fault tolerant control of wind turbine system - a review,” Baton Rouge, Estados Unidos, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/GREEN.2011.5754880>.
- [57] F. P. García y M. Papaelias, *An overview of wind turbine maintenance management*, Nom-Destru. Ed., Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2020.
- [58] M. Ángel and R. López, “Metodología para sistemas inteligentes de detección de mal funcionamientos en equipos. Aplicación a los aerogeneradores [Tesis doctoral dirigida],” 2015, [Online]. Available: <http://dialnet.unirioja.es/descarga/tesis/46488.pdf>.
- [59] et al. B. Hahn, “Recommended practices for wind turbine farm data collection and reliability assessment for O&M optimization.” *Energy Procedia*, pp. 358–365, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.360>.
- [60] et al. CRUZ, M., “SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance, Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox, Computers in industry.” pp. 552–568, 2006.
- [61] and H. H. Z. Daneshi-Far, G. A. Capolino, “Review of Failures and Condition Monitoring in Wind Turbine Generators.” presented at the XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Roma, 2010.
- [62] “Global Wind Energy Council.” <https://gwec.net/> (accessed Jul. 10, 2021).
- [63] “Proyecto CMSWind.” <http://www.cmswind.eu/> (accessed Jul. 20, 2021).
- [64] “BVG Associates.” <https://bvgassociates.com/>.
- [65] “Aerogeneradores basado en la experiencia. Acciona Windpower.” [Online]. Available: <https://mediacdn.acciona.com/media/1787901/awp-2015-es-oct.pdf>.
- [66] “The wind power. Wind Energy Market Intelligence.” https://www.thewindpower.net/turbine_es_180_acciona_aw-1500-77.php (accessed Aug. 12, 2021).
- [67] G. P. Sullivan, R. Pugh, A. P. Melendez, and W. D. Hunt, “Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency,” *Fed. Energy Manag. Progr.*, no. August 2010, p. 321, 2010, [Online]. Available: http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/omguide_complete.pdf.