



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Escuelas de Ingenierías Industriales

Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE ALTERAN LOS RESULTADOS DE
LAS ANALÍTICAS DE ACEITE DE LAS MULTIPLICADORAS EN
ENERGÍA EÓLICA. PROPUESTA DE SOLUCIÓN**

José Ramón del Álamo Salgado

Tesis dirigida por:

Dr. Mario J. Durán Martínez

Dr. Francisco Muñoz Gutiérrez


Septiembre, 2022





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: José Ramón del Álamo Salgado

 <https://orcid.org/0000-0003-2500-6196>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es



*A mis cuatro abuelos,
en especial al Aichi,
el auténtico ingeniero de la familia.*



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



D. José Ramón del Álamo Salgado

Estudiante del programa de doctorado en Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética de la Universidad de Málaga, autor de la Tesis, presentada la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: “Análisis de los factores que alteran los resultados de las analíticas de aceite de las multiplicadoras en energía eólica. Propuesta de solución”.

Realizada bajo la tutorización de Dr. Mario J. Durán Martínez y Dr. Francisco J. Muñoz Gutiérrez.

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 13 de septiembre de 2022.

Fdo: José Ramón del Álamo Salgado

Doctorando

Dr. Miguel Alejandro Atencia Ruiz

Tutor del doctorando

Fdo: Dr. Mario J. Durán Martínez

Director del doctorando

Dr. Francisco J. Muñoz Gutiérrez

Director del doctorando



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



MARIO JAVIER DURÁN MARTÍNEZ, CATEDRÁTICO DE UNIVERSIDAD, ADSCRITO AL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

HACE CONSTAR que la Tesis Doctoral “**Análisis de los factores que alteran los resultados de las analíticas de aceite de las multiplicadoras en energía eólica. Propuesta de solución**” ha sido realizada bajo mi dirección, dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética.

INFORMA que las publicaciones que avalan esta tesis son aportaciones originales, que han sido desarrolladas como parte de la investigación y que no han sido utilizadas como aval de tesis anteriores.

AUTORIZA su presentación por considerar que reúne todo los requisitos formales y científicos legalmente establecidos para que el doctorando **D. José Ramón del Álamo Salgado** obtenga el título de Doctor por la Universidad de Málaga.

Málaga, a 13 de septiembre de 2022

Fdo.: Dr. Mario J. Durán Martínez

Director de la Tesis



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



FRANCISCO J. MUÑOZ GUTIÉRREZ, PROFESOR TITULAR DE UNIVERSIDAD, ADSCRITO AL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

HACE CONSTAR que la Tesis Doctoral “**Análisis de los factores que alteran los resultados de las analíticas de aceite de las multiplicadoras en energía eólica. Propuesta de solución**” ha sido realizada bajo mi dirección, dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica y Eficiencia Energética.

INFORMA que las publicaciones que avalan esta tesis son aportaciones originales, que han sido desarrolladas como parte de la investigación y que no han sido utilizadas como aval de tesis anteriores.

AUTORIZA su presentación por considerar que reúne todo los requisitos formales y científicos legalmente establecidos para que el doctorando **D. José Ramón del Álamo Salgado** obtenga el título de Doctor por la Universidad de Málaga.

Málaga, a 13 de septiembre de 2022

Fdo.: Dr. Francisco J. Muñoz Gutiérrez

Director de la Tesis



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



RESUMEN

Este trabajo investiga el impacto de diferentes situaciones habituales dentro de la operación y mantenimiento de un parque eólico que alteran los resultados de las analíticas de aceite de una multiplicadora en un aerogenerador. El análisis se basa en datos operativos claves recopilados de 40 aerogeneradores multi megavatio en distintas ubicaciones de España. Estos aerogeneradores cuentan con una variedad de tecnologías contrastadas de algunos de los fabricantes más relevantes a nivel mundial. El estudio incluye diversas situaciones y decisiones frecuentes en la operación de un parque eólico, como fugas y reposición de aceite, instalación de filtros offline, sustitución de marca de aceite, sustitución de válvulas, modificación en la posición de la toma de muestra o instalación de filtros de aire especiales, y cómo estas situaciones pueden provocar falsas alarmas. Se analiza como esta información errónea puede propiciar modificaciones en la operación y mantenimiento de parques eólicos con nuevas tareas que implican costes innecesarios o incluso la sustitución del equipo por no disponer de una información fiable que determine el estado real, tanto del aceite, como de los componentes internos de la multiplicadora. Adicionalmente se analizan los datos y situaciones históricas tras un siniestro, confirmando los efectos de las diferentes situaciones no contempladas en las analíticas. Los resultados experimentales concluyen que la información completa y fiable es crucial a la hora de detectar situaciones de riesgo y evitar sus consecuencias.



Tras analizar y detectar las operaciones que alteran los resultados de las analíticas de aceite, se verifican los datos brutos recolectados por los diferentes operadores y transferidos a los laboratorios, concluyendo que en la mayoría de los casos la información relevante recogida en esta investigación no se traslada, por lo que el laboratorio es desconocedor de estas situaciones.

Los problemas derivados de esta falta de valiosa información se mitigarían con el envío, desde el operador del parque eólico hasta el laboratorio, de toda la información relevante de la operación del aerogenerador y la multiplicadora. Es por ello por lo que en esta tesis doctoral se propone una plantilla detallada, lista para un uso industrial, que contribuiría a estandarizar la información manejada por todos los actores implicados. La plantilla sugerida, que está diseñada sobre la base de amplios resultados experimentales y un análisis en profundidad, proporciona información detallada para que los laboratorios mejoren las conclusiones, recomendaciones y planes de acción.

Así mismo, la tesis doctoral trata de proporcionar un alto valor añadido para los investigadores cuyos trabajos se relacionen con la investigación del mantenimiento del aceite de las multiplicadoras. Adicionalmente, el impacto global de la propuesta en la industria eólica puede ser muy relevante en términos de beneficios y, en última instancia, será un avance en la evolución de la operación y el mantenimiento de los parques eólicos.



ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Consideraciones preliminares.....	13
1.2. Motivación / Justificación	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivos generales.....	15
1.3.2. Objetivos específicos.....	15
1.4. Organización del documento	16
2. CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE	18
2.1. Energía eólica. Evolución mundial. Estimación futura de crecimiento. Consecuencias	18
2.2. El aerogenerador.....	19
2.2.1. Breve descripción	19
2.2.2. Rotor.....	20
2.2.2.1. Tren de potencia	21
2.2.2.2. Sistema de transformación de energía	21
2.2.2.3. Sistema de refrigeración	22
2.2.2.4. Sistema de orientación.....	22
2.2.2.5. Sistema de control.....	23
2.2.3. Eólica marina (Offshore). Consecuencias.....	23
2.2.3.1. Condiciones ambientales	23
2.2.3.2. Particularidades de los aerogeneradores <i>offshore</i>	24
2.2.3.3. Operación y mantenimiento de parques eólicos <i>offshore</i>	25
2.2.4. Costes de las maniobras.....	26
2.2.5. Estimación de vida útil	28

2.3.	O&M en la eólica	30
2.3.1.	Descripción	30
2.3.2.	Programa de mantenimiento	31
2.3.2.1.	Trabajos preventivos	31
2.3.2.2.	Trabajos correctivos	32
2.3.2.3.	Trabajos predictivos	33
2.3.2.4.	Otros.....	33
2.3.3.	Diagnóstico de averías en instalaciones de energía eólica	33
2.3.4.	Sistemas de seguridad para el mantenimiento.....	34
2.3.5.	KPIs (<i>Key Performance Indicators</i> ; Indicadores Claves de Actuación) utilizados en el sector.....	35
2.3.5.1.	Concepto de disponibilidad.....	35
2.3.5.2.	Factor de carga. Horas equivalentes. Producción	37
2.3.5.3.	Curva de potencia	38
2.3.5.4.	Seguimiento de temperaturas	38
2.3.5.5.	Tasa de fallos de grandes componentes	39
2.3.5.6.	Número de correctivos.....	39
2.3.5.7.	Evolución del número de incidencias.....	39
2.3.5.8.	Horas de trabajos preventivos	39
2.3.5.9.	Otros KPIs utilizados en el sector eólico.....	40
2.3.6.	Tipos de empresas de mantenimiento.....	41
2.3.7.	Grupos de trabajos.....	42
2.3.8.	Equipos presenciales vs. equipos por zonas	44
2.3.8.1.	Procesos de documentación	45
2.3.9.	Modelos de operación. Producción, disponibilidad, valor del activo y coste del servicio	46
2.3.10.	Tareas	48
2.3.10.1.	Seguridad.....	48
2.3.10.2.	Revisión de los valores de operación y niveles	50
2.3.10.3.	Limpieza y pintura	51

2.3.10.4.	Engrases	52
2.3.10.5.	Otros.....	52
2.4.	La multiplicadora.....	53
2.4.1.	Breve descripción. Funcionamiento.....	53
2.4.2.	Daños típicos internos.....	55
2.5.	El aceite de la multiplicadora	57
2.5.1.	Duración del aceite.....	57
2.6.	O&M en la multiplicadora y su aceite.....	58
2.6.1.	Trabajos preventivos en la multiplicadora.....	58
2.6.2.	Averías y alarmas habituales.....	61
2.6.3.	Tomas de muestra.....	62
2.7.	Laboratorios	63
2.7.1.	Descripción.....	63
2.7.2.	Parámetros analizados. Tipos de test	64
3.	ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE PUEDEN ALTERAR LOS RESULTADOS DE LAS ANALÍTICAS DE ACEITE DE UNA MULTIPLICADORA	68
3.1.	Datos de entrada de las analíticas de aceite en la actualidad	68
3.2.	Caso 1. Fugas y relleno de aceite	74
3.3.	Caso 2. Sustitución del aceite y de marca	75
3.4.	Caso 3. Instalación de filtro off-line portátil	76
3.5.	Caso 4. Alta temperatura del aceite y reemplazo de válvulas termostáticas	78
3.6.	Caso 5. Posición de la toma de muestra	79
3.7.	Caso 6. Sustitución de filtros de aire.....	79
3.8.	Prognosis de la multiplicadora	81
4.	RESULTADOS.....	82
4.1.	Resultados ensayo 1. Fugas y relleno de aceite.....	82
4.2.	Resultados ensayo 2. Sustitución de la marca del aceite.....	84
4.3.	Resultados ensayo 3. Instalación de filtro portátil offline	87
4.4.	Resultados ensayo 4. Alta temperatura del aceite y sustitución de válvulas termostáticas	91



4.5.	Resultados ensayo 5. Posición de la toma de muestra.....	94
4.6.	Resultados ensayo 6. Sustitución de filtros de aire.....	95
4.7.	Resultados. Prognosis de los daños de la multiplicadora	96
4.7.1.	Sustitución de rodamiento.....	96
4.7.2.	Sustitución de la multiplicadora.....	98
4.7.3.	Daños en engranajes	99
4.7.4.	Sustitución de la multiplicadora.....	100
4.8.	Resumen resultados.....	101
5.	PROPUESTA DE PLANTILLA DE ANALÍTICAS DE ACEITE EN MULTIPLICADORAS	103
6.	CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	107
	ANEXO I. SAMPLE TEMPLATE PROPOSAL	111
	Bibliografía.....	115



1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Consideraciones preliminares

En muchas industrias, en uno u otro momento, se han dado prácticas habituales que, aunque no han sido lo suficientemente contrastadas y analizadas en profundidad, se han generalizado, incluso estandarizado, y se han considerado como válidas. Con el paso del tiempo, y asociado a un incremento de la experiencia y del conocimiento, estas prácticas se han ido modificando, mejorando e incluso en algunas ocasiones, directamente reemplazando definitivamente. Esto es más acusado en unos sectores que en otros, ya sea por una menor facilidad de estandarización de los trabajos, por la dificultad de ir aumentando un conocimiento profundo de los aspectos relevantes que deben ser tenidos en cuenta o por un rápido crecimiento que en ocasiones impide un sosegado análisis inicial, así como la adaptación y mejora de todos los procesos.

En el caso de la industria eólica, se ha experimentado un enorme crecimiento en los últimos años, pasando de 24 GW en 2001 a más de 743 GW en 2022 [1], lo que representa un aumento de más del 3000% en los últimos 20 años. Lejos de reducirse esta tendencia, se espera que este aumento continúe en el marco del acuerdo de la comunidad internacional para promover una energía más limpia y sostenible [2]. En estos últimos años, paralelamente al crecimiento exponencial de la potencia instalada total, la energía eólica se ha convertido en la tecnología renovable más madura y desarrollada [3] y desempeña un papel fundamental en el mix energético actual, proporcionando un alto rendimiento con una mayor fiabilidad [4].

La tecnología mayoritaria instalada en los parques eólicos a nivel mundial cuenta con multiplicadoras para transformar la energía mecánica proveniente del giro de las tres palas del rotor por la acción del viento [5]. Esta energía cuenta con unas características de baja velocidad de giro y un alto par y es transformada en energía mecánica de alta velocidad de giro y bajo par, con el fin de aportar la energía necesaria para que el generador transforme la energía mecánica en energía eléctrica [6].

A pesar del avance de la tecnología y el diseño y de la fabricación de aerogeneradores cada vez de mayor tamaño y potencia, la topología del sistema de conversión de la energía sigue siendo fundamentalmente la misma, por lo que la multiplicadora continúa siendo una parte

esencial en la presente y futura cadena de funcionamiento de un aerogenerador, exceptuando aquellos que se configuran como *direct drive* al diseñar el generador con un alto número de polos [7].

La multiplicadora es uno de los elementos sometidos a mayores cargas y conlleva elevados costes de sustitución porque requiere la intervención de grúas externas de gran tonelaje. Una multiplicadora estándar en un aerogenerador de 2 MW puede pesar unas 15 toneladas, tiene más de 20000 kNm de par y tiene unos 250 litros de aceite. Por lo general, tiene una combinación de engranajes rectos, helicoidales y planetarios para alcanzar una relación de transformación que puede ser superior a 1:100 en un aerogenerador estándar de 2 MW [8].

Para asegurar el correcto funcionamiento de la multiplicadora, es esencial que todo el sistema de rodamientos y engranajes internos esté lubricado por aceite [9]. El aceite de la multiplicadora no tiene únicamente la función de reducir la fricción y el desgaste debido al contacto entre diferentes elementos metálicos, sino también el de refrigerar el sistema y proteger de la corrosión y la contaminación.

Estos activos cuentan con un detallado plan de mantenimiento programado que incluye los análisis, por parte de un laboratorio acreditado, de muestras del aceite en uso [10]. Para comprobar que el aceite mantiene las propiedades en un estado óptimo, se llevan a cabo analíticas que determinan el posible grado de contaminación y degradación del aceite, proporcionando información sobre el estado del lubricante, el entorno operativo (entorno en el que opera el aerogenerador) y el estado de la multiplicadora (desgaste interno del equipo).

1.2. Motivación / Justificación

La mejora de la operación y mantenimiento de las multiplicadoras de los aerogeneradores, determinando para ello la información necesaria para realizar un diagnóstico fiable y sin falsas alarmas.

Para lograr este objetivo se es necesario proceder con la búsqueda de las situaciones que alteran los resultados de las analíticas de aceite y que han de ser tenidas en cuenta, así como la detección de las deficiencias en la transmisión de información real de la operación de las multiplicadoras a los laboratorios.

Actualmente se adolece de un criterio común para definir la información a nivel global que ha de ser entregada desde los parques eólicos a los laboratorios de aceite, y es cada mantenedor o cada laboratorio quien proporciona la información que considera oportuna. En cualquier caso, es un factor común, que no toda la información relevante que altera los resultados de las analíticas de aceite es tenida en cuenta para que el laboratorio las valore en sus conclusiones y recomendaciones y, por tanto, estos se pueden ver alterados.

Esta ausencia de detección de estas situaciones y de conocimiento por parte del laboratorio que analiza las muestras de aceite de la multiplicadora, tiene en muchas ocasiones consecuencias negativas sobre los activos, con distinto grado de importancia, tanto operativas, como económicas, y de ahí la relevancia del asunto tratado en la presente tesis doctoral.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

El objetivo general es mejorar la fiabilidad de los aerogeneradores mediante la disminución en la tasa de fallos de las multiplicadoras y sus consecuencias asociadas. Este objetivo se logra a través de un detallado análisis del estado del arte de la información y procedimientos utilizados en la actualidad, así como de la ejecución de unos ensayos que identifican qué factores tienen consecuencias en los resultados de las analíticas del aceite en las multiplicadoras. Esto se concretaría en un procedimiento que permita trasladar, desde el parque eólico al laboratorio de aceite, toda la información operativa relevante para analizar la muestra y así mejorar las conclusiones y recomendaciones, haciéndolas más fiables y particularizadas.

1.3.2. Objetivos específicos

- 1) Realizar un estudio del estado del arte del sector eólico, ahondando en el campo de la operación y mantenimiento de los aerogeneradores, en especial en lo relacionado con las multiplicadoras y su aceite, tanto a nivel académico como industrial.
- 2) Estudiar la información que es recogida e intercambiada en los procedimientos de las tomas de muestra de aceite de las multiplicadoras entre las principales empresas de mantenimiento y los laboratorios de aceite.

- 3) Analizar las fuentes potenciales de error en la toma de datos, que pueden alterar los resultados de las analíticas, ya sea mejorándolos, empeorándolos o simplemente ocultándolos.
- 4) En base a extensivos resultados experimentales, determinar las situaciones y acciones rutinarias que alteran los resultados de las analíticas de aceite y las consecuencias asociadas, como deterioro de los equipos, nuevas tareas o costes innecesarios.
- 5) Confirmar cómo el uso de información (detallado en 2) poco fiable e insuficiente hace imposible priorizar el mantenimiento preventivo y predictivo sobre el mantenimiento correctivo.
- 6) En base a los resultados experimentales (mostrados en 4) y al análisis de la información utilizada (detallada en 2 y 5), definir una plantilla que contenga la información que debe ser rellenada en la toma de muestra con la información relevante de la multiplicadora y el aceite de esta para ser aplicada a nivel global en los parques eólicos, proporcionando una visión novedosa de los diferentes aspectos del mantenimiento del aceite de la multiplicadora que tiene como objetivo proporcionar un alto valor de archivo para los investigadores y profesionales en este campo.

1.4. Organización del documento

El documento está organizado tal y como se establece en el artículo 20 del Reglamento de los Estudios de Doctorado por la Universidad de Málaga, estructurando su contenido en diferentes capítulos.

En el capítulo II, Estado del Arte, se estudia el rápido crecimiento de la industria en los últimos años y las consecuencias que ello ha conllevado en cuanto a las prácticas y metodologías de las diferentes estrategias de mantenimiento. En este capítulo se analiza la evolución del sector eólico, profundizando en los componentes del aerogenerador y la multiplicadora, así como sus averías más frecuentes y las tareas de mantenimiento preventivo que se llevan a cabo, haciendo hincapié en las características especiales de la energía eólica marina. Se profundiza en la operación de los parques eólicos, incidiendo en los tipos de empresas que ejecutan el trabajo preventivo de un parque eólico, la organización de los equipos de trabajo, las estrategias de la vida útil de los parques eólicos, los costes de las maniobras, las variables que se manejan para

una buena operación y rentabilidad de los parques eólicos, las consecuencias de apostar por la calidad en los trabajos, y las consecuencias que todo ello conlleva. Por último, se profundiza en la lubricación de la multiplicadora, las técnicas de control de este aceite para asegurarse su buen estado y las características de los laboratorios acreditados donde se ejecutan estos ensayos.

El análisis de los datos de entrada de las analíticas de aceite en la actualidad es abordado en el capítulo III, donde se detallan los campos mínimos recomendables que han de ser tenidos en cuenta para trasladar la información desde el parque eólico hasta el laboratorio y se contrasta con la información real que actualmente comparten algunas de las principales compañías de mantenimiento eólico con los principales laboratorios de análisis. Adicionalmente, se describen los ensayos que se han llevado a cabo. Se han ejecutado un total de siete ensayos en cuarenta aerogeneradores de diferentes tecnologías en cuatro emplazamientos distintos, describiendo detalladamente el sentido de cada uno de ellos y el objetivo buscado, incluyendo en el análisis la información enviada desde el operador al laboratorio y el tipo de conclusiones de este.

En el siguiente capítulo IV, se detallan y se discuten los resultados de todos los ensayos llevados a cabo, a la luz de los extensos resultados experimentales. Cada situación se estudia individualmente basado en casos reales de 40 aerogeneradores en siete ubicaciones diferentes. En el caso de la prognosis, se analizan cuatro casos reales, desde su consecuencia y daño final, yendo hacia atrás para analizar los resultados de las analíticas y hechos relevantes anteriores al fallo.

Posteriormente, en el capítulo V, se propone una plantilla para su envío con cada muestra de aceite desde el parque eólico al laboratorio, incluyendo toda la información que previamente se ha demostrado relevante para que el laboratorio pueda aportar las mejores conclusiones y recomendaciones en cada análisis.

Por último, en el capítulo VI, se detallan las conclusiones obtenidas y los posibles trabajos futuros que pueden estar asociados a los trabajos desarrollados y descritos en esta tesis doctoral.

2. CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

Existen estudios previos sobre todo el proceso del mantenimiento del aceite de la multiplicadora [11], pero es más limitada la información sobre el campo específico abordado en esta tesis. Una de las razones de esta falta de estudios es que este caso se refiere a un entorno complejo como un aerogenerador [12], a más de 80 metros de altura de media, donde en muchos casos en el pasado no se reportaban todas las situaciones que se generaban, en unas ocasiones por desconocimiento de las implicaciones y consecuencias generadas a partir de esas casuísticas, y en otras por carecer de procedimientos que obligasen al reporte de toda esa información. A pesar de que esto dificulta la recopilación y el análisis de los datos, existe información relacionada con los análisis de aceites en las multiplicadoras de los aerogeneradores, así como la relación con otros sistemas predictivos [13], proveniente directamente de las empresas [5] o laboratorios [14] involucrados en este sector y no tanto de publicaciones académicas. En el caso de esta tesis se aborda el impacto de diferentes situaciones habituales dentro de la operación y mantenimiento de un parque eólico que alteran los resultados de las analíticas de aceite de una multiplicadora en un aerogenerador.

En este capítulo se aborda el estado del arte, comenzando con una descripción la aplicación de destino (energía eólica) para posteriormente abordar los detalles de la operación y mantenimiento, tanto en la eólica en tierra, como en el mar. También se profundiza en la multiplicadora y las tareas específicas necesarias para su mantenimiento, en especial la del análisis del aceite. Por último, se describen los laboratorios que analizan estas muestras y los parámetros objeto de estudio.

2.1. Energía eólica. Evolución mundial. Estimación futura de crecimiento. Consecuencias

En la actualidad, la implantación y el crecimiento de las instalaciones de energía eólica es una realidad a nivel mundial [15], con una tecnología contrastada y un robusto tejido industrial en torno a ella, donde la mayoría de los países tienen sus planes de implantación desarrollados y en fase de ejecución [2]. Esta estrategia generalizada, implica un gran crecimiento de la potencia instalada con consecuencias que afectan a la operativa de los parques eólicos.

Con el aumento del volumen de megavatios y la globalización del sector se consolida una industria que dispondrá de mayores recursos para la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías y soluciones, abaratar costes con economías de escala y disponer de más información para depurar la tecnología [16]. La estandarización de los procesos, los avances en materia de seguridad y salud, la formación y profesionalización de los técnicos y las sinergias entre compañías o parques eólicos dentro de una misma compañía se ven favorecidos por este crecimiento. Así ha sucedido en las últimas décadas, donde las mejoras en términos de

fiabilidad, productividad y competitividad han sido unas características clave para el éxito de esta energía renovable.

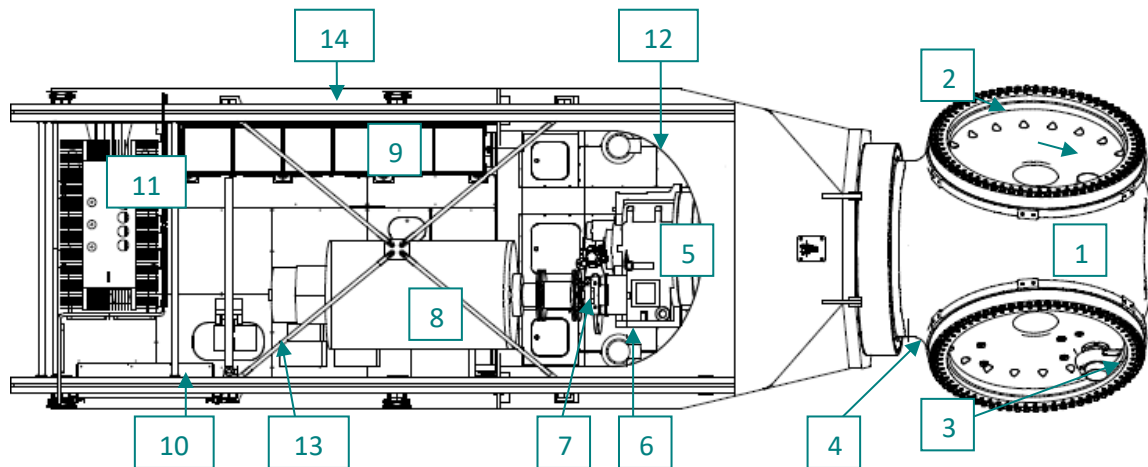
No obstante, el rápido crecimiento vivido por el sector eólico también tiene implicaciones menos positivas. El bagaje histórico de experiencias no es dilatado y en este contexto se evolucionan modelos de aerogeneradores que no han llegado al final de su vida útil [5]. Ni siquiera a sus últimos años. Esto implica que, a pesar de que los componentes y tecnologías utilizados en los parques eólicos en general y los aerogeneradores en particular sí cuentan con más antigüedad y experiencia en otros campos, la combinación de estos componentes en un parque eólico y aerogenerador genera en ocasiones situaciones no contempladas o no tan testeadas como sería deseable. Este crecimiento acelerado unido a las condiciones de operación especiales, con gran impacto de las condiciones atmosféricas, instalaciones aisladas, dificultades en el acceso (gran altura) o posibles deficiencias en el reporte de todas las situaciones que pueden alterar la operación del activo, dificultan en ocasiones la adaptación a cambios, nuevos conocimientos, aportaciones y ensayos basados en la experiencia real.

La estimación futura es la de seguir con un fuerte crecimiento [17] [18], de ahí que sea indispensable detectar, analizar y solucionar todos los aspectos de la operación y el mantenimiento de la energía eólica (también los de menor prioridad), que el rápido crecimiento y los objetivos de corto y medio plazo han ocultado.

2.2. El aerogenerador

2.2.1. Breve descripción

Los aerogeneradores han evolucionado desde sus comienzos, pero el diseño más generalizado es el tipo de rotor tripala a barlovento [19], que se muestra en la figura 1. Los aerogeneradores multimegavatios cuentan con diferentes modelos y versiones para operar en diferentes condiciones de viento [5]. Hay aerogeneradores con diferentes alturas de rotor, de diámetro de rotor, versiones de frecuencias (50 Hz o 60 Hz),



- | | |
|----------------------------|-----------------------|
| 1. Buje | 8. Generador |
| 2. Corona del pitch | 9. Convertidor |
| 3. Accionamiento del pitch | 10. Armario top |
| 4. Eje lento | 11. Transformador |
| 5. Multiplicadora | 12. Reductoras |
| 6. Freno mecánico | 13. Polipasto |
| 7. Unión flexible (cardan) | 14. Góndola o góndola |

Figura 1. Esquema de una góndola y rotor con sus principales componentes de la plataforma FL2500 2.5 MW.

2.2.2. Rotor

El rotor se compone de tres palas, del buje, tres coronas giratorias y accionamientos para el cambio del ángulo de paso, es decir, para el giro de la pala sobre su propio eje que define el ángulo de inclinación de las palas frente al viento.

Las palas pueden estar fabricadas de resina epoxi reforzadas con fibra de vidrio y fibra de carbono. Las dos conchas pueden estar unidas por diferentes sistemas internos y están conectadas al rodamiento de la pala y este a su vez al buje. En la punta especialmente, pero también a lo largo de las palas, tienen receptores de rayos unidos al conjunto del aerogenerador por una red de tierra equipotencial. En este caso, va desde la punta de la pala, que es donde más probabilidad hay de que impacte el rayo (por carga electrostática y por el ser el punto con mayor altura), hasta el buje.

El buje es el componente donde se conectan las tres palas a través de sendos rodamientos y se une a la *góndola* por medio del eje lento o en ocasiones (limitadas en número) directamente a la multiplicadora. Dentro del buje se encuentran los motores de giro de pala y baterías en el caso

de pitch eléctrico o los cilindros de giro y acumuladores en el caso del pitch hidráulico. También se ubica el armario de control del buje.

Este tipo de aerogeneradores cuentan con una regulación de sistema de cambio de paso independiente en cada pala que regula constantemente al ángulo óptimo para las condiciones actuales de viento y con un sistema de orientación activo. El sistema de control permite operar el aerogenerador a velocidad variable maximizando la producción de energía y minimizando tanto las cargas a las que está sometidas el propio aerogenerador, como el ruido. El sistema de regulación de cambio del ángulo de paso (sistema de pitch) tiene un sistema redundante para evitar problemas de una velocidad de giro excesivo del rotor, que sería fatal para el aerogenerador.

2.2.2.1. Tren de potencia

El tren de potencia consta del eje principal, la multiplicadora y la unión flexible con el generador.

El eje principal transmite la potencia desde el rotor a la multiplicadora. Puede tener uno o varios rodamientos que lo unen al bastidor y permite el giro del eje. Hay modelos de aerogeneradores donde el eje principal no existe porque la multiplicadora está unida directamente al buje, aunque es menos habitual [7].

La multiplicadora está situada entre el eje lento y el generador y transforma un par alto con bajas revoluciones a un par bajo con altas revoluciones. Está unida al bastidor por medio de unos apoyos, también llamados brazos de par, que cuentan con partes flexibles para permitir una tolerancia de movimiento que absorba las vibraciones entre la multiplicadora y el bastidor.

El eje rápido, también llamado unión cardan, transmite la energía desde la multiplicadora al generador. La funcionalidad doble de este elemento es la de trabajar como unión flexible entre los dos componentes y adicionalmente actúa como protección ante una posible desalineación de ambos. Ante una situación como esta, esta unión sufriría una sobrecarga que le provocaría daños o incluso la rotura, evitando los daños en los dos componentes principales.

2.2.2.2. Sistema de transformación de energía

El aerogenerador puede contar con diferentes inversores y convertidores que disponen de diferentes componentes como los IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) que funcionan como elementos finales de control de potencia electrónicos. Esta tecnología proporciona un sistema de accionamiento dinámico con buenas propiedades de red.

El transformador, que puede ser seco o sumergido en aceite, tiene la función de transformar la potencia eléctrica generada de baja tensión en media tensión. Esto depende de la tecnología, ya que en algunos casos se genera en media tensión y el transformador hace la función inversa para dar

la tensión requerida por los servicios auxiliares. El transformador puede estar situado en diferentes ubicaciones, desde la *góndola*, pasando por la zona media de la torre, a la base e incluso en el exterior del aerogenerador.

La celda de media tensión se suele ubicar en la base del aerogenerador en el caso de torres tubulares o dentro de una subestación compacta en el caso de una torre de celosía. La celda aislada en gas y encapsulada en metal está equipada con un interruptor de potencia en vacío según IEC 298, un seccionador selector de barras con enclavamiento mecánico, un seccionador de puesta a tierra y un relé de protección.

2.2.2.3. Sistema de refrigeración

La multiplicadora, el generador y el inversor del aerogenerador pueden disponer de sistemas de refrigeración activos e independientes uno de otro. La refrigeración de la multiplicadora se efectúa con un circuito de refrigeración del aceite por aire. La refrigeración del generador y del inversor pueden ser por agua o por aire. Todos los sistemas están diseñados para proporcionar temperaturas de servicio óptimas aun cuando las temperaturas exteriores sean muy altas. El agua de refrigeración suele estar mezclada con glicol para protegerla de la congelación. El propio habitáculo de la *góndola* también puede disponer de ventiladores que refrigeran el aire interior del habitáculo.

Las temperaturas de diferentes puntos de estos componentes, como el aceite de la multiplicadora, de los devanados del generador, de los módulos del inversor, el aceite del transformador (cuando aplique) y de los refrigerantes se miden automáticamente a través de sensores de temperaturas (PT-100). En función de los estados y valores operacionales se regulan los circuitos de refrigeración de manera que el rango de temperaturas permanezca, a ser posible, constante y dentro de las condiciones de operación marcadas. Cuando una de las temperaturas mencionadas excede un umbral de aviso predeterminado, el aerogenerador enviará una alarma de aviso, procederá a una reducción automática de la potencia o incluso a la parada completa.

La disipación del calor de la multiplicadora hacia el intercambiador de calor aceite/aire se consigue con un sistema de bombas de accionamiento mecánico y eléctrico. Los intercambiadores de calor suelen ser refrigerados por el aire ambiental exterior.

2.2.2.4. Sistema de orientación

Los sensores de dirección del viento, anemómetros y veletas miden continuamente la dirección del viento a la altura del buje. El margen de tolerancia que representa la desviación entre la dirección del viento y la posición de la *góndola* depende de la velocidad del viento. La orientación se realiza con motores reductores que accionan una corona giratoria con dentado interior. Cuando la *góndola* está parada, se activan los frenos hidráulicos (mordazas) de la corona giratoria y los frenos de accionamiento electromecánico de los motores.

El yaw corrige la posición de la góndola automáticamente cuando la torsión de los cables colocados a lo largo de la torre alcance un valor límite. En algunas tecnologías, la corona está dividida en varios sectores para mayor facilidad de reparación de posibles daños en dientes.

2.2.2.5. Sistema de control

El control, la regulación y visualización del aerogenerador se efectúan con un controlador lógico programable (PLC) que consulta los sensores y sistemas del aerogenerador y del entorno en tiempo real, que evalúa los datos obtenidos con ayuda de algoritmos probados y que pasa el resultado en forma de información de salida en función de los parámetros prefijados a los actores y sistemas.

El sistema de regulación se encarga de seleccionar los valores adecuados de velocidad de giro del aerogenerador, del ángulo de paso de las palas, y de las consignas de potencia, modificándolos en cada instante dependiendo de la velocidad de viento que registra el aerogenerador, garantizando una operación segura y fiable en cualquier condición de viento existente, la minimización de cargas mecánicas, la maximización de la producción eléctrica de calidad y la reducción de ruido aerodinámico.

2.2.3. Eólica marina (Offshore). Consecuencias

2.2.3.1. Condiciones ambientales

En los parques situados en el mar, parques *offshore* [20], a todos los condicionantes ambientales que limitan los trabajos en un parque eólico en tierra, parques *onshore*, habrá que añadir otros como la visibilidad y el estado del mar, ya que con altos oleajes podría no ser posible el acceso a las turbinas, por lo que el acceso al parque está más limitado [21].

En el mar, el viento es menos turbulento que en tierra. Esto se debe a que las diferencias de temperatura a diferentes altitudes de la atmósfera que hay sobre el mar son inferiores a las que hay sobre la tierra. La radiación solar puede penetrar varios metros bajo el mar mientras que en tierra la radiación solar sólo calienta la capa superior del suelo, provocando unas temperaturas más altas. Por este motivo, las diferencias de temperatura entre la superficie y el aire son menores sobre el mar que sobre la tierra. Este hecho es uno de los factores que provocan que la turbulencia sea menor y repercuta en un menor estrés, y por tanto una mayor vida útil, en algunos componentes del aerogenerador [22].

Por otro lado, la rugosidad en el mar también es menor que en tierra [23]. Esto es debido a que la superficie del mar es muy lisa y los obstáculos sobre el mar son mínimos. No obstante, así como con velocidades del viento constantes, la rugosidad es muy baja, con velocidades de viento crecientes, parte de la energía del viento se emplea en producir oleaje, lo que implica un aumento de la rugosidad. Una vez se han formado las olas, la rugosidad vuelve a disminuir. Por

tanto, a diferencia de los parques *onshore* (y a excepción de zonas específicas cubiertas con nieve), será una superficie de rugosidad menor, pero variable.

Respecto a las condiciones ambientales, son mucho más agresivas en cuanto a la salinidad [24], lo que incrementaría el riesgo por daños por corrosión u otros tipos de consecuencias como deterioros en los aceites. No obstante, los aerogeneradores están preparados para operar en estas condiciones, con mayores protecciones frente a la corrosión.

2.2.3.2. Particularidades de los aerogeneradores *offshore*

Aunque los aerogeneradores son muy similares a los que se utilizan en tierra y normalmente de mayor potencia, hay algunas diferencias que afectan a la operación y mantenimiento de estos [25] y que incluso buscan aportar una mayor fiabilidad que los aerogeneradores *onshore*:

- Como norma general son torres más pequeñas (puede estar en torno a 0,75 veces el diámetro del rotor), debido a que el cizallamiento del viento en el mar es más bajo. Esto es posible debido a la baja rugosidad, que implica que se alcance la misma velocidad de viento a una menor altura. Este hecho también supone una menor diferencia de viento y esfuerzos cuando las palas están en el punto más bajo y el punto más alto, lo que conlleva una disminución de los esfuerzos en la pala.
- Según los modelos de aerogenerador, podrán tener una grúa incorporada para sustituciones de grandes componentes del aerogenerador, con el fin de evitar el coste de la grúa en el mar.
- Las cimentaciones pueden ser de varios tipos dependiendo de la profundidad y del diseño del aerogenerador. Las más utilizadas en aguas poco profundas son por gravedad, monopilote enclavado y trípode [26].
- En ocasiones disponen unas cabinas de fibra de vidrio donde se ubican el transformador, celdas y armarios eléctricos.
- El generador suele ir cerrado por un elemento aislante que lo proteja de la salinidad y la humedad. Al contrario de los aerogeneradores *onshore*, donde es habitual (no siempre) que dispongan de refrigeración aire-aire, en estos aerogeneradores se suelen utilizar sistemas cerrados de refrigeración de agua-aire para evitar la aspiración de aire externo húmedo y con alto nivel de salinidad.
- Como medidas de protección ante la corrosión, en primer lugar, se utiliza un tipo de pintura con una protección mayor que en los aerogeneradores situados en tierra (la parte del pilote que se insertará en el fondo irá sin pintar para aumentar la fricción con el suelo), además se utilizará una protección catódica para proteger las zonas sumergidas. Esta protección catódica

puede ser utilizada como un sistema pasivo, utilizando ánodos de sacrificio, o un sistema activo, si se aplican corrientes eléctricas. Cualquiera de los sistemas (con larga tradición en todo tipo de plataformas marinas), serán fiables.

- En ocasiones, dependiendo del tipo de emplazamiento respecto al acceso a los aerogeneradores, la distancia a la costa y el comportamiento general del mar, pueden tener plataformas encima de la góndola para el traslado en helicópteros de los técnicos y del material necesario para los mantenimientos.
- En los parques marinos, debido a las grandes dimensiones del diámetro de rotor de los aerogeneradores y los altos regímenes de viento, la distancia entre las máquinas deberá ser mayor por el alto efecto que tendrían las sombras, también llamadas estelas, entre ellas, que provocaría aumento de las pérdidas y cargas, así como una disminución del rendimiento.

Para realizar la evacuación de la electricidad producida, se instalará una primera subestación en el mar (con las correspondientes protecciones catódicas, de pinturas y encapsulamiento del transformador), donde se producirá una transformación a 220 ó 400kV (para minimizar las pérdidas por las largas distancias). La conexión utilizada puede ser en alterna (como es habitual en parques *onshore*) o en continua. Debido a las limitaciones en los cables de corriente alterna para largas distancias (esta distancia crítica está en torno a los 40-50 km.), normalmente se utilizará corriente continua por su mejor capacidad de energía en la transmisión que soluciona el problema de los parques eólicos de gran potencia instalada a largas distancias de la costa.

2.2.3.3. Operación y mantenimiento de parques eólicos *offshore*

En primer lugar, hay que tener en cuenta que, con carácter general, se podría concluir que los aerogeneradores *offshore* producen más que los aerogeneradores *onshore* situados en terreno liso [27]. Esto implica que las rutinas de trabajos preventivos toman mayor relevancia, ya que la máquina está sujeta a un mayor número de ciclos de trabajo y mayores desgastes. Estos mantenimientos deben ejecutarse de manera exhaustiva cumpliendo perfectamente tanto los tiempos, como los alcances.

En los parques *offshore*, las decisiones y estrategias a adoptar son claves, ya que las consecuencias serán de mayor trascendencia que en los parques *onshore* [28]. En el caso de cualquier avería no rearmable de manera remota, puede ocasionarse una gran pérdida de producción y disponibilidad porque puede pasar un periodo tiempo relevante hasta que se tenga acceso al aerogenerador. Adicionalmente, pueden existir meses con peor accesibilidad que otros, por lo que una buena programación resulta indispensable [29].

Por otro lado, el mantenimiento predictivo cobra mucha más importancia para determinar el fallo antes de que ocurra [30]. Se realizarán tareas como i) inspecciones exhaustivas rutinarias,

ii) implantación de sistemas de monitorización (monitorización de palas, monitorización de tren de potencia, análisis de aceites y de grasa, análisis sonoros, etc.) y iii) análisis y control exhaustivo de los datos del parque eólico: producción, alarmas, curvas de potencia, etc., con el fin de conocer mejor las características del parque con sus puntos débiles y poder aplicar las soluciones pertinentes (ver sección 2.3.5).

En cuanto a la formación de los técnicos, los entrenamientos son mucho más exigentes, ya que además de las funciones habituales de los aerogeneradores en tierra, los técnicos deben estar preparados para descender desde un helicóptero o permanecer varios días en el aerogenerador a la espera de poder ser evacuados [31]. Las dos formas más utilizadas para el transporte de los técnicos son en barco y en helicóptero. Si las aguas no son muy bravas se tiende a escoger la primera opción por motivos económicos. Las ventajas del helicóptero son que no se ven afectados por el estado de la mar (aunque sí por el viento y la visibilidad) y que tardan menos tiempo en llegar al aerogenerador (siempre que el helicóptero esté listo cuando se necesite). Por el contrario, el coste es bastante mayor, hace falta un equipo más especializado, no es posible para ciertas averías como fallos en rodamientos del yaw y es necesario tener instaladas caras plataformas en cada aerogenerador.

Tareas como la supervisión y mantenimiento de los componentes que están debajo de la superficie del agua, serán realizadas por equipos humanos especializados en cimentaciones o tendido del cable submarino.

Los costes de operación y mantenimiento *offshore* son mucho más elevados que los costes *onshore* [32]. Además de esta mayor necesidad de formación y especialización de los técnicos, disponer de embarcaciones o helicópteros, emplear un mayor tiempo de preventivo a cada máquina, etc. Uno de los motivos principales de este incremento es que el coste de la sustitución de un gran componente es mucho más elevado por la embarcación utilizada.

2.2.4. Costes de las maniobras

A pesar de que las técnicas de resolución de problemas han mejorado en el sector de la energía eólica en general y para las multiplicadoras en particular, evitando un porcentaje relevante de sustituciones y reduciendo los costes de manipulación, la sustitución de una multiplicadora es una de las tareas más costosas dentro de la operación de un parque eólico [33]. Por lo tanto, toda la información que pueda ayudar a tomar una decisión que afecte a la operación del aerogenerador en general y a la multiplicadora en particular, es crucial para evitar situaciones con un impacto económico significativo [34].

Es importante destacar el impacto del lucro cesante por pérdida de producción durante la parada del aerogenerador. En cualquier maniobra, como la sustitución de una multiplicadora, la posibilidad de poder programar la sustitución del gran componente adquiere una gran

relevancia, ya que, en numerosas ocasiones, el tiempo empleado en la logística para hacer llegar el componente y la grúa a parque, es incluso mayor que el de la operación de la sustitución.

En el impacto económico de la sustitución de una multiplicadora en aerogeneradores hay varios factores clave que condicionan los costes reales:

- El coste de la propia multiplicadora, que dependerá de aspectos como el tamaño, del volumen de unidades disponibles o de la oferta y demanda (muchas veces se almacenan para un grupo elevado de aerogeneradores) [35]. Cada vez es más frecuente la sustitución de multiplicadoras dañadas por otras reparadas y no nuevas. Esto tiene una importante influencia en la disminución del coste de la sustitución y es posible gracias a que la flota de aerogeneradores y multiplicadoras es cada vez mayor y los trabajos de reparación en talleres especializados se han demostrado muy fiables. El coste aproximado de una multiplicadora nueva puede estar en torno a 230.000 € y una reparada en una franja entre 80.000 € - 160.000 € (dependiendo de los trabajos de reparación que haya que abordar).
- Internalización de los trabajos. Los mantenedores que cuentan con un volumen importante de unidades bajo servicio y poseen un taller de reparación propio disponen de grandes ventajas para evitar sobrecostes en los trabajos. Esto mismo puede ocurrir en el caso de las grúas que, si no son directamente propias, si pueden acceder a contratos competitivos al generar un gran número de maniobras anuales.
- Precisamente la grúa es la otra gran partida además de la propia multiplicadora. La primera estrategia para evitar este coste es la de trabajar preventiva y predictivamente para detectar los daños en una fase temprana y poder hacer reparaciones “*uptower*” del componente dañado (rodamiento, engranaje, etc..). También se está trabajando en grúas incorporadas en la propia *góndola* para evitar el trasladado de una grúa externa al parque eólico, con la adaptación de viales y plataformas asociadas a dichos traslados y trabajos [36]. También la disposición del propio aerogenerador será importante, ya que en algunos casos hay que bajar el rotor y las tres palas para poder sustituir la multiplicadora. En ese caso el coste aproximado será de unos 60.000 €. Si no es necesaria la retirada de estos componentes adicionales sería una cifra inferior, en torno a 15.000 €. También este será un factor determinante en las horas hombre de trabajo, ya que en el primer caso estaría en torno a las 200 horas/técnico y en el segundo se reduciría hasta las 50 horas/técnico.
- Es importante señalar que el coste y el precio final pueden tener una diferencia importante. En el caso de un fabricante que asume el riesgo de este tipo de daños en un contrato a largo plazo, tiene que estimar costes futuros (adicionales al propio coste del componente sustituido, grúas o mano de obra) por posibles incrementos de precio en el largo plazo de materias primas, transporte, aduanas, roturas de stock, etc., y por tanto los precios para el cliente final se pueden incrementar de manera relevante. De hecho, también en ocasiones se

excluye de los contratos por las dificultades mencionadas que puede acarrear situaciones onerosas para alguna de las partes.

Los seguros también tienen sus limitaciones en este tipo de coberturas, ya que únicamente cubren hechos fortuitos e inesperados y habitualmente se cuenta con franquicias, tanto en el coste total de la maniobra, como en el de la pérdida de producción. Adicionalmente los seguros cuentan con cláusulas de siniestros en serie que limitan la cobertura de siniestros repetitivos.

Todos estos factores tienen aún un impacto mayor en el caso de la eólica marina por el encarecimiento de todas las etapas descritas (ver sección 2.2.2).

Dado el elevado coste de abordar una maniobra de este tipo, el posicionamiento cada vez más decidido por todos los actores es el de apostar por unas técnicas preventivas y predictivas, donde se incluye un buen programa de análisis e interpretación de los resultados de las analíticas del aceite de la multiplicadora.

2.2.5. Estimación de vida útil

Las fases del ciclo de vida de un parque eólico constan de promoción, construcción, explotación y desmantelamiento (retirada de los aerogeneradores) o repotenciación (sustitución por otros, normalmente de mayor tamaño) [37]. Las fases más tempranas de este ciclo de vida también tendrán efecto en la operación de cada una de las máquinas por aspectos como la selección del emplazamiento, con unas condiciones meteorológicas asociadas de temperatura, velocidad de viento, turbulencia, etc., o la ejecución de posición de las cimentaciones, que definirán las coordenadas y altura del aerogenerador, lo que tiene consecuencias sobre las turbulencias y el efecto vertical.

La estimación de vida útil de un aerogenerador suele estar en torno a los 20 o 25 años desde el comienzo de la operación, dependiendo del certificado tipo que aporte cada fabricante. No obstante, cada vez son más frecuentes los estudios de extensión de vida útil de los aerogeneradores [38]. Esto es posible porque las máquinas son seleccionadas para cada emplazamiento según la clase de viento, es decir, se seleccionan aerogeneradores que cumplan con las condiciones más desfavorables de velocidad de viento y turbulencia. En muchas ocasiones las cargas del tipo de aerogenerador seleccionado cumplen de forma holgada con las condiciones reales del emplazamiento, de ahí que se analice el remanente de vida estructural que quedaría más allá de la vida útil estimada en un inicio. Incluso en ocasiones se añaden estrategias de mitigación de daños más efectivas basadas en minimizar las causas de las condiciones que consumen la vida útil de los componentes. Tareas de inspección o ensayos no destructivos también son claves para conseguir alargar más la vida útil de los elementos estructurales del aerogenerador [39].

Estos estudios pueden ser realizados por el propio fabricante del aerogenerador [5], ya que posee las cargas aerolásticas del modelo en concreto al ser el diseñador de este y al mismo tiempo conoce el recurso eólico real del emplazamiento. También pueden ser llevados a cabo por empresas externas con complejos análisis basados en la evaluación de los efectos reales de las condiciones específicas de cada emplazamiento en la vida útil de los aerogeneradores, modelando en detalle las condiciones de contorno:

- Condiciones de viento específicas del sitio, modelando para cada emplazamiento específico y para cada dirección del viento (de acuerdo con los efectos topográficos y la orografía del emplazamiento) aspectos como los niveles de turbulencia, la cizalladura del viento, los ángulos de ataque del viento, la altitud y la humedad específica en los períodos de verano e invierno (densidad del aire) y los efectos de las estelas [40].
- Condiciones particulares de operación, modelando el número de paradas rápidas del aerogenerador que consumen vida o una posible operación no óptima en el parque eólico, como pueden ser paradas de larga duración sin un mantenimiento óptimo, una operación con las superficies de palas degradadas o bajo carga de hielo o desalineaciones de la posición de la *góndola*.
- Morfología real del aerogenerador y sus componentes suministrados, modelando los efectos de las características de cada modelo de aerogenerador (por ejemplo, las dimensiones de las palas hacen que la turbina sea muy sensible a la fatiga aerodinámica) y las diferencias entre los parámetros de diseño originales del aerogenerador y los componentes reales suministrados en el consumo de vida (por ejemplo, las palas pueden ser más pesadas que en diseño, lo que consume vida útil).
- Inspección del estado del aerogenerador [39] y verificación del cumplimiento de los tiempos y alcances de los trabajos de preventivo estipulados por el fabricante.

El hecho de considerar la extensión de vida útil más allá de la vida útil inicialmente estimada hace que adquiera una mayor relevancia incluso la estrategia de mantenimiento preventivo y predictivo, donde se incluye el análisis del aceite de la multiplicadora, con el fin de conservar el activo en las mejores condiciones posibles. Este tipo de estrategia no se lleva a cabo únicamente en los últimos años de vida útil inicialmente estimada, sino que debe comenzarse desde las etapas tempranas de la operación. Si se comienza tarde, tal vez no sea posible a pesar de contar con remanente de vida útil teórica, ya que la correcta operación del aerogenerador es clave para poder extender esta vida útil.

2.3. O&M en la eólica

2.3.1. Descripción

Las características especiales presentes en los parques eólicos y aerogeneradores suponen un reto para la continua adaptación de la operación y mantenimiento de estos activos [41]. Algunas de estas características especiales son: i) la evolución en tamaño, con dimensiones crecientes, especialmente de torres o palas (las grúas y los procedimientos para la sustitución de una pala de 30 metros de largo serán diferentes al caso en que la longitud de la pala es de 60 metros), ii) evolución de los componentes, con modificaciones continuas en campos mecánicos, eléctricos, electrónicos o hidráulicos, iii) antigüedad del aerogenerador, donde se adaptan los checklist de verificación específicos para determinados períodos de tiempo con tareas específicas cada cinco o diez años, iv) las condiciones meteorológicas de los emplazamientos que afectan a la integridad del aerogenerador o v) la variedad de modelos y versiones de los aerogeneradores, ya que una misma tarea de mantenimiento puede ejecutarse de forma diferente dependiendo del tipo de aerogenerador [42].

La operación y mantenimiento de un aerogenerador es compleja por la casuística que le acompaña: i) es necesario trabajar en una instalación que se encuentra a más de 80 metros de altura (en promedio), ii) depende de condiciones atmosféricas como viento, frío, calor, tormentas eléctricas, etc., iii) implica trabajar con componentes eléctricos, electrónicos, mecánicos, hidráulicos, físicos y químicos, y iv) se generan cientos de señales en un parque eólico produciendo millones de datos que deben ser procesados y analizados. Estas variables dependen de todo tipo de factores internos y externos, y no es sencillo correlacionarlas entre sí o sumar otras que no son fácilmente estandarizadas para llegar a conclusiones fiables. No obstante, incluso con estas dificultades presentes en la operación y mantenimiento de un parque eólico, siempre se busca alcanzar altos niveles de disponibilidad y factor de capacidad, además de la conservación de los aerogeneradores.

A pesar de que los componentes individuales se han utilizado comúnmente en el sector eólico (por ejemplo, multiplicadoras, generadores, convertidores o transformadores), su inclusión en la generación de aerogeneradores de varios megavatios de nuevo diseño [43], con todas las condiciones de operación mencionadas anteriormente, sin duda, tiene un impacto en la incertidumbre de la vida útil del equipo. Aspectos como el limitado espacio en los aerogeneradores, las condiciones ambientales agresivas y especiales a las que están sujetos (especialmente en ubicaciones en el mar), o la falta de estandarización entre las diferentes tecnologías han sido históricamente factores clave en la operación global de los activos.

2.3.2. Programa de mantenimiento

El programa de mantenimiento estándar de un parque eólico incluirá el mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo de todos los aerogeneradores, de sus centros de transformación y del sistema de control, así como la monitorización de los aerogeneradores [44].

Estos trabajos incluyen la mano de obra, consumibles, piezas de repuesto, medios auxiliares, desplazamiento, transporte, etc., necesarios.

2.3.2.1. Trabajos preventivos

Una vez que el parque comienza el periodo de explotación, se hará un primer mantenimiento que será de gran importancia para hacer un buen reajuste de todos los componentes una vez que el aerogenerador ha tenido unas horas mínimas de operación. Posteriormente, dependiendo del fabricante, lo más habitual es realizar mantenimientos programados cada seis meses, entre mantenimientos semestrales y anuales, con tareas comunes y distintas entre ellos.

Los trabajos preventivos son trabajos programados en el aerogenerador cuyo objetivo es el de detectar fallos repetitivos, aumentar la vida útil de equipos, minimizar los tiempos de parada, disminuir costes de reparaciones o detectar puntos débiles en la instalación [45].

El estricto cumplimiento de los preventivos, tanto de las gamas, como de los tiempos y plazos para ejecutar estos trabajos, es esencial para un buen rendimiento del aerogenerador durante su vida útil.

Se puede concluir que el mantenimiento preventivo cumple con dos funciones:

- Evitar o mitigar las consecuencias por fallos o alarmas en los equipos antes de que ocurran, con los consiguientes beneficios en cuanto a tiempos de parada, planificación de trabajos y mejoras económicas, que tienen un gran impacto en componentes como la multiplicadora.
- Asegurar la durabilidad, fiabilidad y rendimiento de los equipos durante su vida útil.

Algunas ventajas del mantenimiento preventivo serían:

- Aumento de la rentabilidad.
- Optimización de los costes operativos y de repuestos.
- Reducción de los niveles de inventario.

-
- Optimización de los equipos de trabajo.
 - Mejora de la planificación de las paradas.
 - Aumento del conocimiento de los activos.
 - Incremento de la vida útil de los equipos.
 - Aumento de la disponibilidad y el rendimiento.
 - Disminución de los trabajos de correctivo.
 - Reducción de los tiempos por paradas por alarmas y averías.

2.3.2.2. Trabajos correctivos

Adicionalmente se realiza un mantenimiento correctivo continuo dentro de los horarios acordados, donde se incluye la reparación y mantenimiento correctivos en consonancia con la última revisión del manual de mantenimiento.

Los trabajos correctivos son trabajos que se llevan a cabo para mantener el aerogenerador operativo y en buenas condiciones. Se realizan una vez que se ha producido el daño con el fin de corregir y reparar una posible avería en el equipo [46].

Los trabajos correctivos se pueden dividir en:

- No planificados. Se debe actuar lo más rápidamente posible (cumpliendo con las condiciones de operación y seguridad) con el objetivo de evitar costes, pérdidas por tiempos de paradas y daños materiales.

En estos casos, en el diagnóstico de la avería se puede emplear incluso más tiempo que en la propia ejecución de los trabajos de reparación ya que no siempre la causa raíz del problema tiene una fácil detección. Para llegar a una solución óptima minimizando retrasos es necesario contar a tiempo con los repuestos, herramientas específicas, así como personal cualificado para este tipo de trabajos.

- Planificados. Se conoce con anticipación qué es lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el aerogenerador para efectuar la reparación, se debe disponer del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para acometer los trabajos correctamente.

2.3.2.3. Trabajos predictivos

Los trabajos predictivos permiten hacer una predicción del fallo antes de que éste ocurra. Los sistemas utilizados se basan en las características físicas y el modo de utilización y de fallo, con el fin de poder evaluar sus consecuencias y aplicar los trabajos pertinentes [47].

Tareas como endoscopias, mediciones de vibraciones en el tren de potencia, análisis de aceites y grasas, mediciones con comparadores, líquidos penetrantes o ultrasonidos son algunos ejemplos [48].

El análisis de los históricos de datos del parque para detectar todas las deficiencias que existan es otro modo de trabajo predictivo, haciendo un especial hincapié en aerogeneradores con peores resultados de disponibilidad, producción y tasas de fallos, con el fin de analizar el origen de los problemas y aplicar la correcta solución.

2.3.2.4. Otros

Adicionalmente se pueden realizar inspecciones con empresas externas para revisar el estado de los aerogeneradores, calidad de los trabajos preventivos y análisis de datos del parque, buscando conocer el estado del parque y así analizar los resultados y rendimientos de los aerogeneradores.

Existen otras inspecciones y certificaciones de elementos de seguridad. Son elementos como las escaleras, líneas de vida, elevadores o incluso extintores u otros sistemas antiincendios, que deben ser ejecutadas por empresas o personal certificado para tal fin. Incluso la certificación de uso de líneas de vida o elevadores son cada vez más restrictivas, pasando de una certificación general para todo tipo de elevadores a una específica de cada fabricante.

De forma periódica (un periodo habitual es cada tres años, pero lo marcará la legislación aplicable), ha de realizarse la inspección reglamentaria de centros de transformación, líneas de evacuación de alta tensión, las mediciones de tensiones de paso y contacto de las líneas de media tensión del parque eólico o centros de transformación de los aerogeneradores. Estos trabajos serán ejecutados por Organismos de Control Acreditados (OCA), que son entidades acreditadas independientes, integrales e imparciales, que verifican el cumplimiento de las condiciones y requisitos de seguridad establecidos en el reglamento vigente en cada localización sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación [49].

2.3.3. Diagnóstico de averías en instalaciones de energía eólica

Para llevar a cabo el diagnóstico de las averías en un parque eólico se hace uso de la monitorización de las alarmas a través de la información aportada por el scada del parque. El

parque eólico es monitorizado en todo momento, ya sea localmente en horario laboral o por el centro de control el resto del tiempo. Cada una de las alarmas tiene su propio protocolo de actuación, incluyendo la decisión de rearme remoto y las condiciones en las que se pueden ejecutar.

Esta información al scada se alimenta de la entrada de datos aportada por los propios sensores instalados en el aerogenerador. Sensores de temperatura PT-100 en rodamientos o aceite de la multiplicadora, señales de revoluciones de giro en el tren de potencia, valores de velocidad o dirección de viento o valores de presión son algunos ejemplos de la información aportada por el propio aerogenerador [50].

Existen también herramientas de detección de averías eléctricas externas a la máquina como el *tester*, pinza amperimétrica, cámaras termográficas, videoscopio para inspeccionar el interior de la multiplicadora, telescopio o reloj comparador que ayudan a diagnosticar averías de diferente naturaleza [51].

Por último, las inspecciones visuales y pruebas de operación son otras potentes herramientas para detectar averías e incidencias en el aerogenerador [39].

2.3.4. Sistemas de seguridad para el mantenimiento

El aspecto de la seguridad es el más relevante en la operación y mantenimiento de un parque eólico debido a las especiales condiciones en la que se lleva a cabo el trabajo. Así, adicionalmente a los equipos de protección individual (EPI) perteneciente a cada trabajador [52], el aerogenerador cuenta con elementos de seguridad constructivos como pantallas de protección de los elementos en tensión, barandillas, protección de elementos móviles, puntos de anclaje de seguridad, pulsadores de parada de emergencia del aerogenerador, líneas de vida, tornillo de separación de tapa de multiplicadora, además de elementos como el kit de descenso de emergencia o extintores. También habrá sistemas de protección eléctrica como el interruptor principal o las celdas de media tensión.

Adicionalmente, hay instrucciones de seguridad que deberán ser de obligado cumplimiento en cada parque. Algunas de estas instrucciones más básicas son:

- El responsable del parque debe conocer en todo momento los trabajos a realizar.
- Los técnicos deben avisar de cualquier condición insegura que observen en su trabajo y advertir de cualquier defecto en los materiales o herramientas a utilizar.
- Informar a los responsables del parque respecto al mantenimiento preventivo para evitar accidentes por rearmes remotos. No obstante, se debe asegurar las maniobras en local para evitar este tipo de situaciones.

- Señalizar los trabajos en el aerogenerador para evitar los rearmes locales.
- Señalizar las zonas de trabajo en caso de trabajos con grúas.
- Detener el aerogenerador según el manual de operación.
- Comprobar las condiciones meteorológicas para evitar tormentas o altos vientos.
- Mantener siempre una distancia de seguridad con los elementos en tensión.
- Observar y cumplir la señalización existente.
- Ir equipado con los equipos de protección individual adecuados según la instalación.
- Cumplimiento exhaustivo de todos los procedimientos internos de seguridad.
- Siempre deberá haber al menos dos personas cuando se accede al aerogenerador.

2.3.5. KPIs (*Key Performance Indicators*; *Indicadores Claves de Actuación*) utilizados en el sector

2.3.5.1. Concepto de disponibilidad

Algunos de los parámetros de seguimiento de la operación de un parque eólico más importantes quedan regulados en los acuerdos entre las partes (mantenedor y propiedad). No obstante, existen otros adicionales que pueden ser complementarios y diferentes en cada caso. El principal parámetro que regula la operación de un parque eólico es la disponibilidad, que determina el porcentaje de tiempo que el aerogenerador está disponible para generar, haya viento suficiente para producir o no, y con algunas salvedades. El valor de la disponibilidad garantizada depende del acuerdo entre las partes, pero suele estar en torno al 97%, de ahí que averías relevantes en la multiplicadora tengan un importante efecto en la disminución y posible incumplimiento del objetivo de la disponibilidad mínima. Una posible disponibilidad estándar se calcularía aplicando (1):

$$\text{Dispo. (\%)} = \frac{\text{Tiempo total} - (\text{Tiempo indisponible} - \text{Tiempo exento})}{\text{Tiempo total} - \text{Tiempo exento}} \times 100\% \quad (1)$$

siendo:

- Dispo. (%): media del total del porcentaje de las disponibilidades de los aerogeneradores del parque eólico.
- Tiempo total: número total de horas en un determinado periodo.

- Tiempo exento: número de horas durante las que la operación de un aerogenerador no es monitorizada debido a la pérdida de las comunicaciones con el aerogenerador (siempre que no sea responsabilidad del mantenedor).
- Tiempo indisponible: número de horas en las que un aerogenerador no está operativo. Se excluyen los siguientes supuestos:
 - Fuerza mayor, condiciones climáticas, parámetro de red y factores externos fuera del rango de operación de las especificaciones del equipo. Ejemplo de hielo en palas.
 - Ejecución de servicios de mantenimiento preventivo y predictivo con un límite de horas anual.
 - Paradas del aerogenerador por desenrollado del cable.
 - Imposibilidad de acceso al emplazamiento por parte del mantenedor.
 - Un determinado número de fallos de red máximo al año que impliquen o requieran la desconexión o parada de los aerogeneradores.
 - Tiempo de parada debido a inspecciones o trabajos de la propiedad.
 - Otros de carácter más contractual como incumplimiento de pagos, modificaciones no acordadas, uso indebido de los equipos por parte de la propiedad o cambios legislativos que requieran modificaciones en el equipo.

Disponibilidad energética. Mientras que en la disponibilidad temporal (1) se tiene en cuenta el tiempo que el aerogenerador está operativo para producir, en la disponibilidad energética (2) se calcula la producción lograda sobre la producción total que teóricamente se podía alcanzar. Esto implica que cuando no hay recurso eólico, es intrascendente si el aerogenerador está en condiciones de producir o no porque no lo va a poder hacer. En cambio, si el aerogenerador no está en disposición de producir con alto recurso eólico, la penalización es mucho mayor que en la disponibilidad temporal.

(2)

$$\text{Dispo. Ener. (\%)} = \frac{\text{Producción teórica total} - (\text{Producción indisponible} - \text{Producción teórica exenta})}{\text{Producción teórica total} - \text{Producción teórica exenta}} \times 100\%$$

siendo:

- Dispo. Ener. (%): media del total del porcentaje de las disponibilidades energéticas de los aerogeneradores del parque eólico.
- Producción teórica total: energía producida real más la producción teórica no generada por el aerogenerador.

- Producción teórica exenta: producción teórica no generada por el aerogenerador debido a pérdida de las comunicaciones con el aerogenerador (siempre que no sea responsabilidad del mantenedor).
- Producción no disponible: producción teórica no generada por el aerogenerador. Se excluyen los siguientes supuestos:
 - Fuerza mayor, condiciones climáticas, parámetro de red y factores externos fuera del rango de operación de las especificaciones del equipo. Ejemplo de hielo en palas.
 - Ejecución de servicios de mantenimiento preventivo y predictivo con un límite de horas anual.
 - Paradas del aerogenerador por desenrollado del cable.
 - Imposibilidad de acceso al emplazamiento por parte del mantenedor.
 - Un determinado número de fallos de red máximo al año que impliquen o requieran la desconexión o parada de los aerogeneradores.
 - Tiempo de parada debido a inspecciones o trabajos de la propiedad.
 - Otros de carácter más contractual como incumplimiento de pagos, modificaciones no acordadas, uso indebido de los equipos por parte de la propiedad o cambios legislativos que requieran modificaciones en el equipo.

Disponibilidad real. Es la disponibilidad sin tener en cuenta el tiempo exento, es decir, únicamente se tiene en cuenta si el aerogenerador está en disposición de producir o no, sin tener en cuenta el motivo por el cual no lo está:

$$\text{Dispo. Total (\%)} = \frac{\text{Tiempo total} - \text{Tiempo indisponible}}{\text{Tiempo total}} \times 100\% \quad (3)$$

siendo:

- Dispo. Total (%): media del total del porcentaje de disponibilidades de los aerogeneradores del parque eólico.
- Tiempo total: número total de horas en un determinado periodo.
- Tiempo indisponible: número de horas en las que un aerogenerador no está operativo. No se excluye ningún supuesto.

2.3.5.2. Factor de carga. Horas equivalentes. Producción

El factor de carga es la proporción entre producción que se ha logrado frente a la producción máxima que se podría haber conseguido si estuviera todo el periodo de tiempo a plena carga.

Las horas equivalentes se calculan como el cociente entre la producción neta anual en kWh y la producción teórica en kWh que hubiera podido producir a plena carga. Como en el caso del factor de carga, las horas equivalentes también se pueden calcular modificando el periodo de tiempo o hacerlo individualmente por aerogenerador. La fatiga y esfuerzos a los que está sometida una multiplicadora vendrá determinado entre otros factores por las horas equivalentes de funcionamiento del equipo.

Teniendo en cuenta que el recurso eólico de cada parque es diferente, las comparativas de los parques se suelen hacer con su propio estudio de recurso eólico (del parque), con periodos mensuales para tener en cuenta la estacionalidad (la producción no es igual todo el año y habrá unos meses más ventosos que otros) [53].

2.3.5.3. Curva de potencia

La curva de potencia representa la producción real generada para el viento real presente [54]. Ambos datos serían la media de un diezminutal y en la curva de potencia se representarían todos esos bins (puntos). La visualización, control y análisis de esta nube de puntos, que debe estar cercana a la línea de la curva de potencia garantizada, se puede llevar a cabo en diferentes periodos de tiempo, incluso en modo continuo. En la curva de potencia también quedarán representadas limitaciones de potencia del aerogenerador o paradas del mismo. Si los rangos de temperatura del aceite se superasen, el aerogenerador limitaría su potencia para proteger el equipo y quedaría reflejado en la curva de potencia. Los datos de entrada los aporta el propio aerogenerador (auto curva), lo que conlleva que no es una medición de curva de potencia exacta ni válida en términos de reglamentación, ya que habría que calibrar un emplazamiento y hacer una medición con torre de medición en una posición validada para que así fuera [55]. El viento recogido por los sensores del aerogenerador se ve afectado a su paso por las palas, por lo que cada fabricante aplica una fórmula de ajuste (offset) para adecuarlo al viento real. También las condiciones climáticas de humedad y temperatura provocan diferencias fuera de los rangos de operación. Aunque estos datos no sean válidos contractualmente, sí aportan una información fundamental para detectar posibles problemas en alineamientos, ajuste de palas, deficiencias en estas o lecturas de los propios sensores que hacen de esta herramienta un ejercicio obligado en la operación de un parque eólico.

2.3.5.4. Seguimiento de temperaturas

Haciendo seguimiento a los datos de temperatura de los rodamientos, ya sea de la multiplicadora o el generador, se pueden apreciar tendencias de aumento de temperatura en los mismos que no serán detectados por el aerogenerador hasta que alcance el valor donde salta una alarma [56]. Esos aumentos de temperaturas pueden ser debidos a un defecto de lubricación o un exceso de grasa en el rodamiento, a un defecto en el mismo o a un error de

lectura del sensor de temperatura. Es importante tener en cuenta que durante los meses de verano la temperatura de los rodamientos aumentará por la propia temperatura ambiente. También se observará si hay variaciones después de los mantenimientos preventivos. Por estos motivos es importante hacer la comparativa entre todos los aerogeneradores del parque eólico. Esta misma comparativa se puede realizar con la temperatura del aceite de la multiplicadora.

2.3.5.5. Tasa de fallos de grandes componentes

Tras clasificarlos por periodos de tiempo y por componentes, se pueden llevar a cabo comparativas por parques, tecnologías y plataformas, detectando tendencias o puntos débiles por diferentes variables como los componentes, parques, tecnologías, producción, condiciones del emplazamiento, el mantenedor, número de técnicos, antigüedad, etc. Esta información es muy relevante a la hora de categorizar la fiabilidad de los modelos de multiplicadoras, así como la detección de posibles deficiencias en el proceso de fabricación o por defectos en serie.

2.3.5.6. Número de correctivos

Comparativa entre los diferentes aerogeneradores, así como con otros parques, tecnologías, plataformas o antigüedad. En este estudio también se analizan la duración de las paradas, los tiempos de respuesta y la resolución definitiva de los pendientes. En este caso, el comportamiento de los sistemas auxiliares de la multiplicadora de lubricación y refrigeración son analizados y comparados con detalle.

2.3.5.7. Evolución del número de incidencias

Tanto la resolución de las incidencias ya registradas, en los aerogeneradores en general y en la multiplicadora y sus sistemas auxiliares en particular, como el registro de nuevas incidencias, son monitorizados para analizar el estado de los aerogeneradores y el avance de los trabajos. Estos pendientes están categorizados por gravedad y fecha estimada de resolución.

2.3.5.8. Horas de trabajos preventivos

El cumplimiento de los trabajos de preventivos es clave para una correcta operación del parque eólico. Se analiza, tanto en el caso de exceso de horas, por posible acumulación de retrasos y pérdidas de producción por una mala gestión de los trabajos (también se analiza el viento con el que se producen los trabajos y la pérdida de producción asociada), como el defecto de horas, lo que puede implicar deficiencias en estos trabajos. Adicionalmente se pueden comparar horas con mantenimientos preventivos ejecutados en el pasado o entre diferentes aerogeneradores. Tareas como la limpieza de los sistemas de refrigeración de la multiplicadora puede tener un efecto inmediato en las temperaturas del aceite, disminuyéndola y mejorando sus prestaciones.

2.3.5.9. Otros KPIs utilizados en el sector eólico

Hay otros parámetros que deben ser analizados dentro de la operación de un parque eólico que, aunque no estén directamente relacionados con la multiplicadora, sí son fundamentales para la correcta operación y monitorización del aerogenerador en su conjunto.

- Rosa de los vientos y rosa de energía

La rosa de los vientos es una representación de las distribuciones de las velocidades de viento y la frecuencia de la variación de las direcciones del viento por sectores (360°) [57]. Del mismo modo, la rosa de energía representa las distribuciones de energía y la frecuencia de la variación de las direcciones del viento en estos mismos sectores. Es importante detectar posibles desviaciones que puedan afectar al alineamiento del aerogenerador frente al viento para evitar exceso de cargas en los elementos estructurales y pérdidas de producción. En ocasiones el error está únicamente en la representación por un posible desajuste del sensor norte. El ajuste de este sensor es una de las tareas de los trabajos preventivos. No obstante, un correcto alineamiento del aerogenerador con el viento es básico para minimizar cargas y estrés en componentes como las palas o el propio tren de potencia, donde se incluye la multiplicadora.

- Seguimiento de energía reactiva

La energía aparente generada es la suma vectorial de la energía activa más la energía reactiva [58]. La energía reactiva se mide en kvarh y se genera por el funcionamiento de determinados aparatos eléctricos que utilizan bobinas que transforman la energía en campos electromagnéticos (motores, transformadores, etc.). El factor de potencia viene determinado por el gestor de la red de distribución y transporte, en función del valor de la tensión en el correspondiente nudo de la red de transporte, así que en cada parque eólico habrá unos requerimientos de cumplimiento de un determinado valor o intervalo de factor de potencia. El cumplimiento o incumplimiento de este requerimiento puede llevar acarreadas unas bonificaciones o unas penalizaciones, según la regulación vigente. Cuando los aerogeneradores no son capaces por sí mismos de generar el factor de potencia solicitado, se instalan baterías de condensadores en el parque para poder cumplir con factores de potencia capacitivos más exigentes.

- Pérdidas eléctricas

La producción neta registrada en los contadores es menor a la producción bruta generada por la suma de todos los aerogeneradores. Esto es debido a las pérdidas eléctricas que se generan en el paso de la electricidad por los cables eléctricos [59]. Las pérdidas dependerán de factores como la distancia, la sección o el aislamiento de los cables, el voltaje o la humedad, entre otros, pero es importante confirmar que las pérdidas eléctricas mensuales son similares a

las históricas para descartar posibles problemas localizados entre los aerogeneradores y el contador o problemas de lectura del propio contador.

- Desplazamiento vertical en torres

Con un reloj comparador se mide el desplazamiento vertical de la torre para detectar si existe un hueco de importancia entre la unión de la virola y el hormigón. Esta medición se realiza con una parada del aerogenerador aplicando todas las medidas de seguridad necesarias. El seguimiento de la evolución de estas medidas es fundamental para detectar a tiempo posibles deterioros exponenciales que puedan poner en peligro la integridad del aerogenerador [60].

2.3.6. Tipos de empresas de mantenimiento

Los alcances y los tiempos de los trabajos de preventivos vienen definidos en un primer momento por el tecnólogo, que es quien ha diseñado la tecnología y conoce las necesidades para su correcta operación y mantenimiento durante la vida útil de los equipos. No obstante, tanto los alcances como los tiempos entre preventivos pueden sufrir modificaciones por la propia experiencia local o global. Así, hay ejemplos de reducción de tareas (el marcado de la tornillería puede ser sustituido por el lacrado de esta, reduciendo la frecuencia de los aprietes) o ejemplos de ampliación de trabajos (aumenta de la frecuencia de sustitución de filtros en zonas más polvorientas).

Las empresas que llevan a cabo el mantenimiento de los parques eólicos pueden ser de varios tipos:

- Tecnólogo [5]. El fabricante del aerogenerador es sin duda quien en un primer momento conoce mejor la tecnología y sus necesidades. De forma generalizada estos fabricantes están dispuestos a ofrecer estos servicios y cuentan con la ventaja de disponer de la tecnología, de los componentes cautivos (componentes propios que no están de acceso libre en el mercado), el software que controla el aerogenerador y la tecnología aplicada en el scada de control.
- Trabajos internalizados por el propietario del parque eólico [61]. Esta opción es más habitual en propiedades de gran tamaño, con mucha potencia de una misma tecnología y parques cercanos geográficamente. Estos factores hacen que las sinergias generadas unido al conocimiento de la tecnología a lo largo de los últimos años, sea una opción interesante para este tipo de perfiles de empresas.
- Proveedores independientes de servicios (ISP; *Independent Service Providers*) [62]. El conocimiento a lo largo de los años, el desarrollo de herramientas y procedimientos propios, unido a la contratación de personal con experiencia, hace de estas empresas independientes otra opción en el mercado.

- Multitecnología [5]. Los propios fabricantes cada vez van introduciéndose de forma más frecuente en otras tecnologías distintas a las propias. En la actualidad no es una estrategia de todos ellos y lo habitual es que no sea una apuesta generalizada por cualquier tipo de tecnología, sino que se buscan los tipos de aerogeneradores con un diseño, funcionamiento y componentes similares a los propios. En muchos casos, el primer paso, que es el más complicado, ya se ha dado, de ahí que la tendencia irá en aumento en estos casos concretos.
- Mix. Una vez explicados los diferentes modelos con distintos tipos de empresas, es importante reseñar que, en muchos casos, la combinación de varios de ellos es habitual. Es frecuente que los componentes cautivos sea un obstáculo complejo que se soluciona con un acuerdo con el propio tecnólogo para esa partida. En ocasiones hay partidas del mantenimiento que se diferencian, así se podría hacer el mantenimiento preventivo y pequeño correctivo internalizado y dejar una asistencia técnica con el tecnólogo. Los mercados cada vez son más aperturistas y existen numerosas fórmulas con diferentes tipos de empresas involucradas en la operación de un mismo parque eólico.

2.3.7. Grupos de trabajos

Dependiendo de la organización de la compañía responsable de operación y mantenimiento del parque, los grupos de trabajo que puede haber involucrados pueden ser muy diferentes. Los factores que pueden determinar estos esquemas pueden ser: la filosofía de la empresa en cuanto a la estructura, el volumen de potencia mantenida, las sinergias geográficas con otros parques eólicos cercanos, la experiencia y conocimiento de la tecnología, incluso la dificultad del tipo de tareas a ejecutar y por supuesto las características del personal disponible.

En ocasiones se diferencian grupos de trabajos por trabajos preventivos, correctivos, grandes correctivos, trabajos específicos y departamento de apoyo. Si existe la figura del “jefe de parque”, podrá ser este quien coordine los grupos de trabajo y quien asuma el control de todas las tareas realizadas en parque (tanto por equipos propios o por empresas externas), ya que en definitiva será responsable del estado de los aerogeneradores y el parque en su conjunto.

Los preventivos suelen ser trabajos planificados (planificaciones aproximadas por las limitaciones meteorológicas), metódicos, algunas de ellas tareas repetitivas y de relativa dificultad técnica, pero también están presentes otras de mayor complejidad e importancia para la buena operación del aerogenerador [63]. Estos trabajos cuentan con un checklist específico y se suelen ejecutar en horarios y días laborables, en determinadas épocas del año, con las herramientas, repuestos y consumibles fijados con antelación y procurando siempre cumplir con unas condiciones de parada de máquinas con bajo viento (aunque esto dependerá de circunstancias como el cumplimiento de los tiempos o los acuerdos entre las partes). En este grupo de trabajo en ocasiones se pueden incluir las tareas de *retrofits* (mejoras) en el aerogenerador. Los *retrofits* normalmente no son operaciones de urgencia por lo que se seleccionarán las mejores condiciones

para realizar los trabajos. Estos trabajos siempre estarán definidos en su correspondiente procedimiento de trabajo. Los trabajos relacionados con la multiplicadora se engloban dentro del programa general de mantenimiento del aerogenerador y no precisa de equipos de técnicos específicos.

Durante los trabajos preventivos hay tareas que son comunes a todos los aerogeneradores que están programadas, del tipo de aprietes de pernos o sustitución de filtros, y que serán ejecutadas en el tiempo estipulado para el preventivo, pero hay otras que dependerán de cada aerogenerador, del tipo de fugas de aceite o grasa o rotura de componentes específicos, que pueden ser resueltos de forma inmediata (siempre que se disponga de lo necesario) y por el mismo equipo o se cree un listado de pendientes que puede ser resuelto por el mismo equipo una vez terminados los preventivos de todo el parque o por otro equipo distinto.

Los trabajos correctivos son trabajos no planificados que deben ser ejecutados por personal con experiencia que tenga un conocimiento adecuado de la operación del aerogenerador [64]. La localización de la avería es el primer paso, que en ocasiones puede ser sencillo con la información que el scada del aerogenerador ofrece, pero en otras puede ser de máxima complejidad. Una vez analizada la avería, se deben seleccionar los repuestos y herramientas necesarias y proceder a la reparación. Para proceder a resolver la incidencia, los fabricantes y mantenedores cuentan con procedimientos específicos para las diferentes maniobras y reparaciones necesarias. Los horarios para realizar los correctivos suelen ser más amplios e incluyen en ocasiones fines de semana y festivo para atender las averías que pudieran surgir y evitar la prolongación de las paradas.

Los grandes correctivos se refieren a sustituciones (en ocasiones también a reparaciones complejas) de grandes componentes que por lo general necesitan grúas externas para ejecutar el trabajo. En este caso es imprescindible asegurar que el terreno de la plataforma donde se va a situar la grúa (o grúas si es necesaria una auxiliar adicional) está en las condiciones de resistencia requeridas para el tonelaje de la grúa a utilizar. Para realizar estos trabajos se realizan placas de carga que determinan el estado del terreno [65]. Estos trabajos llevan asociados trabajos previos de desconexión del gran componente a sustituir, ya sea la multiplicadora u otro, y preparación de la maniobra, así como trabajos posteriores de conexión y puesta en marcha del componente sustituido. Para realizar estas tareas serán necesarios los técnicos de preparación de los trabajos, los técnicos que ejecutan la maniobra (pueden ser los mismos o diferentes) y el personal adicional de grúas. Los técnicos implicados en este tipo de maniobras suelen ser personal experimentado debido a la dificultad y riesgo de estas.

Hay trabajos concretos que deben ser ejecutados por técnicos con formación específica en los campos a abordar. Así, se llevarán a cabo endoscopias, medición de vibraciones o ensayos no destructivos como líquidos penetrantes, que serán ejecutados por este personal cualificado para este cometido [48]. En el caso de los trabajos de media tensión, cada es más frecuente que el propio personal que trabaja en el parque reciba esta formación específica para maniobrar las

celdas del aerogenerador e incluso en ocasiones lleven a cabo el propio mantenimiento del transformador del aerogenerador.

En el caso de las palas puede haber diferentes grupos de trabajo implicado en estos trabajos. Si la inspección de palas es con dron (algo cada vez más frecuente), el piloto del dron deberá haber recibido una formación específica, incluso dependiendo de cada país una acreditación específica emitida por un estamento oficial [66]. Si los trabajos se llevan a cabo con telescopio, la persona que ejecuta estos trabajos deberá tener conocimientos generales sobre las palas y específicos sobre el tipo de daños que puede sufrir. En cuanto a los trabajos de reparación, ya sea con plataforma y más aún si se realiza descolgándose con cuerdas deberán disponer de una experiencia adicional de trabajos en altura.

Todos estos grupos de trabajo directamente implicados en el mantenimiento del aerogenerador en campo tienen el apoyo de otros departamentos para llevar a cabo este cometido. Departamentos de compras, ingeniería, seguridad y salud o prevención de riesgos laborales, así como expertos de los diferentes campos abordados, forman parte del engranaje necesarios para la operación y mantenimiento de un parque eólico.

En la mayoría de los casos no es posible internalizar el 100% de los trabajos. Ejemplos como las analíticas de aceites en laboratorios acreditados son un ejemplo de ello.

2.3.8. Equipos presenciales vs. equipos por zonas

Cuando existe un parque eólico aislado de otros y la empresa mantenedora no cuenta con otros en la zona, es habitual que haya presencia permanente (durante horas laborales y guardias) en el parque. Según las empresas de mantenimiento van dando servicio a un mayor número de parques y las sinergias aumentan, es más habitual disponer de técnicos compartidos que dan servicio a varios parques.

Los parques eólicos con equipos presenciales en parque cuentan con la ventaja de disponer de técnicos que conocen perfectamente la casuística de cada aerogenerador, los puntos pendientes de ejecutar y su urgencia, buscan la resolución definitiva de la avería para evitar tener que repetir los trabajos en un periodo de tiempo determinado (las fugas en multiplicadoras es un ejemplo característico), realizan tareas de seguimiento como revisión de palas tras tormentas, conocen al personal de la zona y en definitiva, conocen perfectamente las necesidades y puntos débiles del parque. La personalización de los técnicos adscritos al parque eólico aumenta su importancia.

En cuanto a los parques que no cuentan con presencia en parque, son equipos que pueden ser siempre los mismos o contar con una plantilla más amplia y que cada vez sean técnicos diferentes. En estos casos el conocimiento de los técnicos sobre un parque en concreto no es tan alto, de ahí que el correcto reporte de los trabajos ejecutados y la coordinación de los trabajos cobre una importancia fundamental para lograr los objetivos marcados. La ventaja en este esquema es que se cuenta con un mayor número de técnicos y un equipo multidisciplinar en el que se pueden

organizar grupos de trabajo diferentes y cubrir un horario de trabajo más amplio, además de profundizar en la especialización de las diferentes tareas. La integración, apoyo y crecimiento de los técnicos con menos experiencia se va produciendo de una forma natural con los intercambios de parejas de técnicos (por seguridad, los técnicos siempre deben ir en parejas).

Sirva de ejemplo la toma de muestra del aceite de la multiplicadora. Cuando en el parque con presencia continua, es la misma pareja de técnicos la que recoge la muestra, conocen el historial de la multiplicadora en concreto, si se han llevado a cabo rellenos con aceite limpio o si se han realizado trabajos como limpieza con filtro de aceite portátil. Son los mismos técnicos (o sus compañeros de parque) los que luego procederán al envío y normalmente quedarán informados de los resultados. En el caso de parques que no cuentan con esta presencia, la toma de muestra será llevada cabo por unos técnicos que desconocen el historial de ese equipo y quizás no sea quienes procedan al envío al laboratorio, ni recibirán información sobre los resultados. En este segundo caso es más importante si cabe el establecimiento de un procedimiento y su estandarización, tanto de la recolección de los datos de entrada, como de los procesos intermedios para que no se pierda información muy relevante para la operación del parque.

2.3.8.1. Procesos de documentación

Hay distintos procesos de documentación que definen los trabajos a realizar y los pasos necesarios para realizarlos:

- "*Logbook*". Todos los trabajos de mantenimiento preventivo, correctivo y cualquier tipo de intervención en el aerogenerador deben ser documentados en el libro de registro. El *logbook* debe ser un libro con el histórico de todas las actuaciones que se realicen en cada aerogenerador y es recomendable que esté en la base del propio aerogenerador para una fácil consulta antes de cualquier intervención. En ocasiones, los trabajos de relleno de litros en la multiplicadora queda reflejado, pero no es habitual que se incluya el dato del número de litros.
- Parte de trabajo. Se detallarán todos los detalles de la intervención en el aerogenerador, incluyendo trabajos realizados, tiempo y consumibles empleados, etc.
- Procedimiento de trabajo. Un procedimiento de trabajo es el documento que contiene la descripción de actividades que deben seguirse en la realización de las distintas tareas o trabajos, incluyendo también los diferentes puestos de trabajo dentro de cada tarea, detallando su responsabilidad y participación. En este procedimiento de trabajo se detalla toda la información, documentos, ejemplos, gráficos o fotografías necesarias para definir perfectamente las distintas actividades.

Otro de los objetivos de estos procedimientos de trabajo es el de unificar y controlar el cumplimiento de las rutinas de trabajo y evitar su alteración arbitraria, así como mejorar la eficiencia y la coordinación de los empleados.

- Checklist (lista de verificación). Es un documento desarrollado por el fabricante o mantenedor donde se describen detalladamente los trabajos y aspectos que se deben analizar, comprobar y verificar, así como las tareas que han de desarrollarse para ejecutar los distintos mantenimientos preventivos. Este documento también incluye los consumibles y cantidades de lubricantes que serán necesarios.

Este tipo de documentos sufre con frecuencia modificaciones y actualizaciones, por lo que es fundamental asegurarse siempre de utilizar la última versión disponible.

La correcta cumplimentación de todos los campos del checklist es fundamental para asegurar varios factores:

- Continuación de los trabajos en el caso de ser distintos técnicos los que realizan las tareas.
- Disponer de un histórico de los trabajos realizados y los valores medidos en los mantenimientos.
- Informes mensuales. Mensualmente se debe realizar un informe (no suele ser realizado por los técnicos de campo, pero si deben dar soporte para muchos de los puntos a completar) con el fin de registrar toda la información del desarrollo mensual para poder analizar el rendimiento del parque e ir acumulando un histórico de toda la información (es importante disponer del informe cuanto antes después de finalizar el mes).

En este informe se incluirá información como la producción bruta, individual y total del parque, consumos auxiliares, datos de velocidad y dirección del viento, valores medios, disponibilidad por aerogenerador y total, actividades de mantenimiento preventivo, correcto y predictivo realizadas, etc.

- Informes de averías de importancia. En estos informes se analizará y expondrá la causa raíz del problema y las medidas correctoras adoptadas, con fotografías descriptivas del problema y de la solución aplicada. La sustitución de una multiplicadora es un claro ejemplo de este tipo de reportes.

2.3.9. Modelos de operación. Producción, disponibilidad, valor del activo y coste del servicio

En la operación de un parque eólico hay tres aspectos fundamentales que hay que tener en cuenta: la producción, la disponibilidad (energética, si puede ser) y el estado del activo (también

relacionado con la vida útil y el valor del activo) [67]. Existe un cuarto que es un aspecto transversal que puede afectar a todos ellos, el coste del servicio [68].

La combinación de los tres primeros aspectos no es sencilla, ya que en ocasiones son contrapuestos, es decir, si se focaliza mucho en uno de ellos va en detrimento del otro. Conseguir un buen equilibrio entre los tres no es tarea fácil y se logra con decisiones continuas y diarias basadas en un conocimiento profundo del sector eólico, de la tecnología aplicada, de las condiciones concretas del parque eólico y del conocimiento de los recursos técnicos y humanos destinados al parque.

Cuando se prioriza de forma destacada la producción sobre el estado del aerogenerador, se pueden lograr buenos resultados en el corto plazo, pero no así en el medio o largo plazo. Prácticas como soluciones parciales de las incidencias (sirva de ejemplo la limpieza de fugas de aceite en la multiplicadora sin solucionar de forma definitiva), trabajos preventivos que adolecen de calidad y correctas ejecuciones, retrasos en los tiempos de los trabajos preventivos o reticencias a parar el aerogenerador para realizar trabajos predictivos o de implementaciones de *retrofits*, son algunos ejemplos de este modo de operar. En estas circunstancias, en el medio plazo las paradas se verán incrementadas afectando a la disponibilidad y a la propia producción. El valor de activo, y de sus diferentes componentes (la multiplicadora entre ellos), menguará por su deficiente estado y por una reducción de la vida útil del mismo al operar sin las condiciones exigidas por el fabricante.

En el caso de focalizarse principalmente en la disponibilidad, se tratará de limitar las paradas del aerogenerador más allá de las horas estipuladas para el trabajo preventivo (a veces ni siquiera eso). Es importante reseñar que cuando existe un bajo recurso eólico, el aerogenerador está disponible (no así en la disponibilidad energética), pero no produciendo, por lo que a efectos de producción y de posibilidad de trabajar en el aerogenerador en resolución de puntos pendientes o implementación de mejoras, es decir, en aumentar el valor del activo y su vida útil es un coste de oportunidad perdido.

Los parques eólicos que priorizan el estado del activo por encima de todo, focalizando los esfuerzos en la resolución de puntos pendientes en el aerogenerador, implementando *retrofits*, apostando por proyectos de I+D+i para conocer de primera mano las soluciones que el mercado ofrece [69], cuentan con las ventajas de asegurar el valor del activo, no sólo por una mayor facilidad para extender su vida útil, sino por una mejora de los otros aspectos comentados, tanto producción, como disponibilidad. Obviamente esta forma de operar tiene que ser muy coordinada para aprovechar las ventanas de bajo recurso eólico y llevar a cabo estos trabajos minimizando la pérdida de producción por las paradas que acarrearán y la reducción de disponibilidad. Si estos trabajos se ejecutan en momentos con alto recurso eólico y alto precio de la energía, el efecto sobre la producción será inmediato. No hay que olvidar que el objetivo final de un aerogenerador es el de generar energía eléctrica para verterla a red y obtener un beneficio.

El cuarto aspecto que puede condicionar los tres anteriores es el coste del servicio y asociado a él, el alcance de este [68]. Con un coste elevado y un alcance de máximos será sencillo operar de la forma deseada, pero en el momento que se ajusta el alcance por una disminución del coste, aspecto como los tiempos de respuesta ante averías, los horarios de guardia para dar esas respuestas, los recursos humanos destinados al parque o el stock de repuestos y grandes componentes se pueden ver reducidos, impactando de lleno tanto en la producción, como la disponibilidad o el estado del activo. Así, un equilibrio de los tres primeros aspectos con el coste asociado es fundamental para una correcta operación del parque eólico.

2.3.10. Tareas

Los trabajos que se llevan a cabo en la operación y el mantenimiento de un aerogenerador son muy diversos y abordan aspectos relacionados con la mecánica, electricidad, electrónica, hidráulica o programación, entre otros [70]. Algunas de las tareas concretas que se ejecutan de forma rutinaria se pueden clasificar en diferentes campos como la seguridad, la revisión de valores y de operación y niveles, trabajos eléctricos, limpieza y pintura, engrases, u otros.

2.3.10.1. Seguridad

Los trabajos de seguridad más relacionados con la multiplicadora y sus servicios auxiliares serían:

- Revisión de protecciones partes móviles (eje lento, unión cardan, freno mecánico, etc.
- Comprobación del correcto estado del freno mecánico, al ser un elemento unido a la multiplicadora y que va a asegurar la ausencia de movimiento rotatorio en todo el tren de potencia. Verificación de oxidaciones, fisuras, reducción del grosor del disco o finalización de pastillas de freno.
- Comprobación del estado de la unión cardan. Revisión de posibles fisuras o separación de lamas, indicativo de desalineación entre el generador y la multiplicadora.
- Revisión del péndulo (dispositivo que detecta oscilaciones relevantes en la torre) y sistema de detección de vibraciones, que tiene el mismo objetivo, pero al estar basado en las vibraciones es un sistema más sensible. La multiplicadora es uno de los componentes al que mayores cargas se vería sometido.
- Revisión de posibles fisuras en la fibra de la góndola o buje. Atención a posibles filtraciones de agua en el interior del aerogenerador, especialmente en equipos eléctricos. Los equipos de refrigeración de la multiplicadora es uno de los puntos con mayor riesgo de entrada de agua en el interior del aerogenerador dependiendo de la disposición de este.

- Verificación del correcto funcionamiento del sistema de bloqueo del rotor. Una vez bloqueado es importante limitar al máximo las posibles holguras en el lado del rotor que provocarían pequeños golpes entre dientes, con el consiguiente riesgo de formación de marcas de *stand still* (marcas de estacionamiento) [71].

Otros trabajos de seguridad en el aerogenerador adicionales a los relacionados con las multiplicadoras podrían ser los siguientes [72]:

- Revisión puntos de anclaje.
- Comprobación del correcto estado de trampillas y barandillas.
- Revisión de líneas de vida, elevador y sistemas anticaídas.
- Comprobación del correcto funcionamiento del pulsador de emergencia, también llamado seta de emergencia. Comprobaciones de tiempos de retardo del freno mecánico. Revisión del correcto funcionamiento del rearme de la serie de emergencia.
- Verificación del correcto funcionamiento del elevador.
- Revisión de extintores y sistemas antiincendios.
- Revisión de los productos incluidos en el botiquín de primeros auxilios. Verificación de la caducidad de los productos.
- Revisión del estado de la cartelería y notificaciones de seguridad y salud (instrucciones de primeros auxilios, teléfonos de emergencia disponibles, señalización del plan de emergencia, cinco reglas de oro, señalización de peligro de alta tensión, etc.).
- Comprobación de la correcta velocidad de giro de pitch de las palas.
- Verificación de la diferencia máxima entre los tres cilindros del pitch. Debe ser menor a un valor determinado ($\approx 1^\circ$).
- Verificación del correcto posicionamiento y bloqueo de las palas.
- Revisión del estado de las baterías del pitch y sustitución si procediera.
- Revisión del sistema de evacuación de rayos y detección de posibles defectos causados por rayos.
- Verificación de las distancias mínimas en sujeción de sirga del elevador en el caso de placas. En el caso de sistema de piñones y rueda dentada, revisión de piñones de ataque y desgaste de cremallera. En la opción de cable de acero, revisar la ausencia de deterioro en la sirga y

verificar el correcto estado de la sujeción en la parte superior, así como las guías a lo largo de toda la torre.

- Revisión de los accionamientos de las celdas. Seccionadores de barras, movimiento de varillaje, maniobras de prueba. Comprobación de enclavamientos y de interruptores automáticos.
- Verificación del correcto funcionamiento del enclavamiento a la sala del transformador (cumplimiento de las cinco reglas de oro).

2.3.10.2. Revisión de los valores de operación y niveles

- Revisión de los niveles de aceite en multiplicadora, grupo hidráulico, reductoras o freno mecánico. Revisión de posibles fugas en bandejas recoge aceite.
- Alineado del generador con la multiplicadora con el fin de evitar esfuerzos adicionales sobre el acoplamiento flexible y daños en los propios equipos.
- Comprobación del correcto funcionamiento de sensores de temperaturas, presiones, etc.
- Comprobación de valores de tarados de los termostatos. Comprobación de la correcta activación de estos modificando el valor para que se active. Esto se aplicaría tanto a resistencias calefactoras como a motores de ventiladores o sistemas de refrigeración.
- Comprobaciones de los pares de aprietes de la tornillería. Inspección sonora, de marcado, tensionado o pares de apriete.

Otros trabajos adicionales, incluyendo trabajos eléctricos:

- Revisión de sensores de giro del sistema yaw. Corrección del sensor norte (sensor de posición absoluta).
- Revisión de sensores de viento. Alineación de veleta.
- Comprobación de funcionamiento de UPS (*Uninterruptable Power Supply*; Sistema de Alimentación Ininterrumpida; SAI), versión de software y fecha y hora del PLC [73].
- Revisión de valores de ajustes de reductoras.
- Revisión de los finales de carrera del elevador.
- Verificación de la presión de nitrógeno de acumuladores de palas en el caso de pitch hidráulico.

- Revisión de nivel de SF6 (hexafluoruro de azufre) en las celdas del aerogenerador.
- Mediciones de desplazamiento vertical de la torre para determinar deterioros por posibles holguras entre brida y el hormigón.
- Inspección visual de estado de los conectores, inductivos, conexiones eléctricas y cableados. Revisión de par y distancia de inductivos. Verificación de ausencia de zonas ennegrecidas.
- Revisión de cables de potencia. Ausencia de cantos vivos dañando cables, desgastes o radios de curvatura excesivos.
- Correcto guiado de los cables para evitar contactos con pletinas sin fundas.
- Verificación del color del asilamiento y terminales para detectar puntos calientes y deficiencias en asilamientos eléctricos.
- Comprobación de estanqueidad de cuadros eléctricos. Revisión de puertas, cierres, manillas, porta filtros, etc.
- Verificación visual del correcto estado de las fuentes de alimentación. Confirmación de señal digital de estado OK.
- Comprobación mediante *megger* de los devanados de estator y rotor de generador. Comprobación de resistencia de aislamiento.
- Comprobación de resistencia de filtro de armónicos y su cableado.
- Verificación del correcto funcionamiento de la baliza, en caso de disponer de ella, y del pararrayo.

2.3.10.3. Limpieza y pintura

- Limpieza general de plataformas, góndola, incluyendo multiplicadora, buje, etc.
- Limpieza de carbonilla generada en cuerpo de anillos. Sustitución de escobillas de cuerpo de anillos del generador cuando lleguen al mínimo indicado.
- Limpieza de rejillas de extracción y expulsión de aire, tanto del sistema de refrigeración de la multiplicadora, como de otros componentes como generador, convertidor o *góndola* en conjunto.
- Revisión de posibles obstrucciones en bandejas de recogida de líquidos, como fugas de aceite de multiplicadoras, y vaciado del contenido.

- Revisión de deterioros en pintura. En caso de existir oxidación, retirar óxido antes de proceder a pintar. Análisis de posibles fisuras o desconches en pintura indicativo de fisuras en estadios tempranos en bastidor, torre o buje. Chequeo de posibles filtraciones de agua por deterioro en cubiertas. La tornillería de la tapa de inspección de la multiplicadora también debe ser pintada y protegida cada vez que se retire la tornillería y esta quede dañada.

2.3.10.4. Engrases

- Engrases de rodamientos. Aplicar manualmente en caso de ser engrase manual y comprobar niveles de grase en depósito, así como verificar el correcto funcionamiento de este en caso de engrases automáticos. Esto puede aplicar a rodamientos de palas, eje lento, generador, etc. En el caso de la multiplicadora, el engrase de los rodamientos puede ser ejecutado a través del propio aceite de la multiplicadora.
- Engrase de coronas de yaw y palas. Comprobación de superficies de contacto. Aplicar manualmente en caso de ser engrase manual y comprobar niveles de grase en depósito, estado de almohadillas de engrase en caso de engrases automáticos.

2.3.10.5. Otros

- Sustitución de filtros de armarios eléctricos.
- Revisión de soldaduras. Comprobación de posibles fisuras u oxidaciones.
- Sustitución de filtros de aceite y aire de multiplicadora y grupo hidráulico.
- Revisión sonora por posibles ruidos en motores de giro o de ventilación de góndola, multiplicadora, generador, rodamientos, etc.
- Comprobar estado de silentblocks de las patas de generador, multiplicadora, armarios eléctricos, sujeciones de fibra del buje, etc.
- Revisión de conexiones de tierra de los diferentes elementos del aerogenerador.
- Galgado del entrehierro de los de los motores de giro del yaw.
- Verificación de posibles fugas en sistema deslizante de freno del yaw. Comprobación del correcto funcionamiento del sistema.
- Inspección visual del estado de la superficie del disco de freno del yaw. Verificar ausencia de óxido, desgastes o fisuras.

- Revisión correcto funcionamiento del polipasto. Inspección visual del correcto estado de los eslabones de la cadena y del gancho.
- Comprobación del correcto funcionamiento del freno del polipasto.
- Revisión del estado de los labios de retes exteriores. Posición y estado del retén.
- Comprobación de posibles entradas de agua en la *góndola*.
- Revisión de las lonas de evacuación de aire de refrigeración de generador y multiplicadora. Chequear ausencia de roturas que afecten a la evacuación del aire y por tanto a la temperatura final del equipo.
- Comprobación de fijación de cualquier elemento que se pudiera soltar en el buje creando daños en el resto de los componentes, así como en pintura y fundición.
- Verificación del funcionamiento de las luminarias y tomas de fuerza del aerogenerador.
- Revisión de ajuste de los tacos de las bobinas del transformador.
- Revisión de posibles daños por fuga o efecto corona en las bobinas del transformador.
- Revisión visual del estado de la cimentación. Chequeo de posibles fisuras, filtraciones de agua, holgura entre brida de la torre y hormigón.
- Revisión de pernos exteriores en cimentación. Chequeo de marca de apriete, grasa u otro producto de protección y tapón de protección.
- Inspección de palas. Inspección con telescopio, con plataforma, descolgándose con cuerdas o con robots específicos para esta tarea. Revisión del estado de puntas de palas para detectar posibles impactos de rayo y daños asociados a este.
- Revisión sonora de la pala por posibles ruidos por partes de pegamento endurecido desprendido del interior de esta.
- Verificación del correcto estado y sujeción de guardapolvos de palas.

2.4. La multiplicadora

2.4.1. Breve descripción. Funcionamiento

La función de la multiplicadora es la de transformar la energía con alto par y baja velocidad de rotación proveniente del giro del rotor en bajo par y alta velocidad de rotación para adaptarlo a las condiciones de operación del generador (excitándolo para generar energía eléctrica) [74]. Este

par de salida es transmitido desde el eje de alta velocidad (donde está instalado el disco de freno mecánico) al generador mediante un acoplamiento flexible (unión cardan).

Para conseguir esta transformación, la multiplicadora cuenta con rodamientos y engranajes que lo hacen posible. La disposición de estos puede variar según los modelos de los aerogeneradores. La combinación de etapas planetarias con ejes y etapas paralelas con distintas dimensiones y disposiciones, hacen que esta transformación sea posible. Al ser necesaria una relación de transformación relevante muchas veces superior a 1:100, la limitación de espacio en el propio aerogenerador y la necesidad de buscar equipos compactos que maximicen la lubricación y refrigeración de los engranajes y rodamientos hace necesaria el uso de las etapas planetarias y no únicamente las etapas paralelas.

Los engranajes son mecanismos utilizados para transmitir potencia mecánica entre las distintas partes de una máquina. Los más utilizados en las multiplicadoras son: i) los engranajes rectos, ii) los helicoidales, que transmiten más potencia y velocidad y son más silenciosos respecto a los engranajes rectos, pero se desgastan más y son más caros de fabricar y iii) los planetarios, en este caso tres engranajes externos o satélites rotan sobre un engranaje central o planeta montado sobre un brazo móvil o porta satélites que a su vez puede rotar en relación al planeta, también pueden incorporar un engranaje anular externo o corona, que engrana con los satélites [75].

La multiplicadora está unida al bastidor por medio de unos apoyos, también llamados brazos de par, que cuentan con unos elementos amortiguadores (silentblocks) que absorben las posibles vibraciones generadas entre la multiplicadora y el bastidor. En la parte delantera, se unirá al eje principal o en algunos casos directamente al rotor, mientras que, en la parte posterior, se fijará a la unión flexible (cardan) y posteriormente al generador (el freno mecánico generalmente se acopla directamente al eje rápido de la multiplicadora). Esta unión cardan es la parte más débil del tren de potencia y es la que asumiría las cargas y se dañaría para proteger equipos importantes como la multiplicadora o el generador en caso de desalineación.

Las multiplicadoras de aerogeneradores multimegavatios están equipadas con un sistema de lubricación y refrigeración. Las funciones que lleva a cabo este sistema son:

- Lubricación de los rodamientos y engranajes, incluido el control del flujo de aceite dependiendo de la propia temperatura del aceite. Para ello cuenta con un circuito de tuberías que inyectan el aceite en las zonas más altas de los puntos de contacto para que en la caída por gravedad del aceite y giro de los componentes se cubra la totalidad de los puntos de contacto de engranajes y rodamientos. El aceite caerá a la parte baja de la multiplicadora (cárter) y comenzará de nuevo el circuito de refrigeración y lubricación. El impulso del aceite para realizar este circuito se lleva a cabo por medio de una bomba accionada a través de un motor eléctrico. La regulación del flujo del aceite es gestionada por medio de un variador de

frecuencia que controlará la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

- Refrigeración del aceite. Tras circular por los diferentes engranajes y rodamientos, el aceite aumenta su temperatura y es necesario volver a disminuirla para seguir realizando la misma función. Esto se hace a partir de la circulación del aceite por unos intercambiadores de calor que toman aire del interior o exterior de la *góndola* (según el diseño del aerogenerador) e intercambian el calor con el propio aceite. Este sistema es gestionado a través del PLC que recibe la información de la temperatura del aceite y los rodamientos medidas por las diferentes sondas de temperatura (PT100) dispuestas en la multiplicadora.
- Filtración continua del aceite. Durante este proceso el aceite se va filtrando, tanto por el filtro online, como por el filtro offline (en caso de disponer de él).
- Mantenimiento de la temperatura del aceite dentro de los márgenes definidos por el fabricante. Para ello también cuenta también con resistencias calefactoras sumergidas en el cárter para calentar el aceite cuando sea necesario.

2.4.2. Daños típicos internos

Los daños más frecuentes en una multiplicadora se producen en los rodamientos y engranajes [76] [77]. Existen pequeños daños que pueden evolucionar hacia daños mayores o estancarse y no avanzar [71]. También existen daños fortuitos que no presentan señales de daños prematuros previos.

Los daños más habituales en una multiplicadora son:

- Abrasión. Se produce cuando existen micromovimientos entre dos o más superficies y las asperezas del metal en una superficie (rugosidad de la superficie, picos, etc.) se cortan directamente en una segunda superficie de metal. Cuando hay partículas contaminadas involucradas, las partículas duras se deslizan y ruedan bajo presión, a través de las superficies de los dientes, mostrando signos de acabado labrado, marcas o ranuras de arañazos radiales o alguna otra indicación inequívoca de que se ha producido contacto.
- Marcas circunferenciales. Líneas o arañazos en la dirección de la trayectoria rodante. Puede provenir de pequeñas partículas atrapadas en la jaula de rodillos.
 - Corrosión. Se formará óxido si el agua o los agentes corrosivos llegan al interior de los componentes (rodamientos, engranajes o ejes) en cantidades tales que el lubricante no puede proporcionar protección para las superficies de acero. Este proceso puede conducir a un óxido profundamente arraigado.

- Hendiduras, muescas o deformaciones en los engranajes. Las abolladuras que aparecen principalmente en los flancos de los dientes activos de los dientes de engranajes normalmente son causadas por pequeñas partículas duras que han viajado a través del aceite del engranaje y se han apretado entre los engranajes durante el engranado. En los rodamientos, las pistas de rodadura y los elementos rodantes pueden abollarse si; i) la presión de montaje se aplica al anillo incorrecto, de modo que pase a través de los elementos rodantes, ii) si el rodamiento está sujeto a una carga anormal mientras no está en marcha o iii) hay presencia de partículas extrañas en el rodamiento.
- *Micropitting*. Es un fenómeno de fatiga superficial causado por el estrés del contacto cíclico y el flujo plástico de las asperezas bastante común en los dientes de los engranajes de las multiplicadoras, ya que afecta a la precisión del engranaje y en muchos casos es el primer modo de fallo. Este fenómeno se puede detener o evolucionar a etapas más negativas como pérdida del perfil del diente, *macropitting* (*micropitting* más avanzado), ruido, vibraciones y ruptura de diente. El aspecto es el de una superficie con apariencia esmerilada, mate o manchada de gris. Visto a través de un microscopio, la superficie parece estar cubierta por hoyos muy finos.
- *Stand still*. Estas marcas aparecen con relativa frecuencia y se presentan como marcas, por ambas caras del diente en los engranajes, largas y normalmente delgadas a lo largo del diente del engranaje y a lo largo del eje de las pistas de rodadura y los rodillos del rodamiento. Es el resultado de la rotura continuada de la película protectora del aceite por impactos repetidos, como pequeñas oscilaciones de amplitud y vibración de la posición estacionaria del diente, típico de paradas prolongadas del aerogenerador en posición de embulonamiento, donde las palas no giran, pero hay una pequeña holgura que permite un movimiento mínimo, pero suficiente, para generar este tipo de impactos.
- Desgaste. Puede ocurrir como resultado de la entrada de partículas extrañas en el rodamiento, cuando la lubricación no es satisfactoria o por vibraciones en los rodamientos que no están trabajando correctamente. No es de los casos más comunes.
- *Spalling* (desprendimiento de astillas o escamas). Ocurre como resultado de la fatiga normal, es decir, el rodamiento ha llegado al final de su vida útil normal. Las escamas de material se liberan de la pista de rodadura y elementos rodantes. Esto es un daño acumulativo y conduce a la ruptura de los rodamientos.

2.5. El aceite de la multiplicadora

Entre las principales funciones del aceite de la multiplicadora se encuentran las de: i) separar de la banda de rodadura las superficies, reduciendo el desgaste, ii) asegurar la refrigeración de la máquina, mejorando la disipación del calor, iii) reducir la fricción y aumentar la eficiencia, propiciando el ahorro de energía, iv) proteger el rodamiento, tanto de la corrosión como de la contaminación y v) absorber las partículas de desgaste, es decir, limpiar el sistema [78].

Para cumplir con estos objetivos, el aceite necesita preservar sus propiedades durante su vida útil. Estas propiedades deberían ser: i) resistencia al envejecimiento y a la oxidación, ii) baja formación de espuma, iii) buena capacidad de separación de aire, iv) alta capacidad de carga, v) neutralidad a los materiales (ferrosos, no ferrosos, juntas, pinturas, etc.), vi) capacidad para soportar altas y bajas temperaturas; vii) buena viscosidad y viii) detergencia, es decir, la capacidad de limpiar y disolver la suciedad en el circuito hidráulico [79].

La contaminación y degradación están muy relacionadas entre sí, ya que la primera altera las propiedades físicas y químicas del aceite, provocando un aumento de la degradación. Por otro lado, la degradación genera sustancias no solubles en el aceite que facilitan el proceso de desgaste [80]. Esta suciedad y contaminación en el aceite se debe a presencia de sustancias extrañas con origen externo, pero también interno:

- Entrada de polvo a través de filtros deficientes, respiradores, apertura de tapas, etc.
- Humedad y presencia de agua procedente de los sistemas de refrigeración y de la condensación de la propia humedad atmosférica.
- Óxido generado en piezas metálicas.
- Elementos metálicos procedentes de los propios componentes de la multiplicadora debido a desgastes en engranajes y rodamientos.
- Elementos de degradación del propio aceite que aparecen con el envejecimiento de este, como lacas y barnices.

2.5.1. Duración del aceite

La práctica habitual hace años era simplemente cambiar el aceite periódicamente. Este período, que dependía del mantenedor y del tipo de aceite, oscilaba regularmente entre dos y cinco años. En los últimos años, estas rutinas se han modificado y el aceite se utiliza en función de la información aportada por las analíticas de aceite. Hasta que los resultados de los análisis revelen una degradación importante o el aceite se deseche por otra razón, como el reemplazo

de la multiplicadora, este se considera válido al mantener sus propiedades dentro de los estándares exigidos. De ahí que en la actualidad sea más crítico asegurar un fiable y correcto diagnóstico del aceite de la multiplicadora para asegurar que mantiene las propiedades exigidas para proteger la multiplicadora y alargar así su propia vida útil [81].

La utilización de aceites sintéticos cada vez es más frecuente, ya que, aunque es más caro, la duración es mayor. La principal diferencia entre ambos aceites es la forma en la que se obtienen. Mientras que el aceite mineral se obtiene a partir de la destilación y el refinamiento del propio petróleo, el aceite sintético se obtiene mediante la optimización molecular por síntesis química [82].

Existe un método para determinar la vida útil remanente del aceite (*RUL; Remaining Useful Life*) incluso antes de que aparezcan los primeros deterioros apreciables en el aceite. Este análisis se lleva a cabo a través de un equipo llamado *RULER (Remaining Useful Life Evaluation Routine)* que determina los niveles de resistencia del lubricante respecto a la oxidación, es decir, determina cuantitativamente la vida útil remanente del lubricante midiendo la concentración remanente de los antioxidantes. La comparativa de sus concentraciones de antioxidantes (inhibidores de oxidación) con los de un aceite nuevo, determinará la vida útil remanente del aceite analizado [83].

Cuando el aceite es nuevo, el Ruler es del 100%. Según va consumiendo vida útil este porcentaje va descendiendo, pero en ocasiones la evolución no es siempre decreciente. Esto es debido al refresco de aceite (sustitución de aceites nuevo por el aceite viejo perdido en fugas), lo que provoca un aumento en el valor final.

2.6. O&M en la multiplicadora y su aceite

La mayoría de los aerogeneradores están equipados con una multiplicadora, que contribuye con beneficios bien conocidos, pero también agrega una nueva fuente potencial de eventuales fallos [84]. Por lo tanto, se vuelve de suma importancia establecer un procedimiento de mantenimiento claro y efectivo para minimizar las paradas no programadas del aerogenerador y sus consecuencias asociadas, como los costes de sustitución donde es requerida la intervención de grúas externas de gran tonelaje [85].

2.6.1. Trabajos preventivos en la multiplicadora

En los trabajos preventivos del aerogenerador se incluyen tareas específicas que afectan a la multiplicadora. La frecuencia de estas tareas suele ser semestral o anual, pero dependerá de la propia tecnología y del mantenedor. Los trabajos más frecuentes se describen a continuación:

- Cuerpo de la multiplicadora.
 - Inspección de unión atornillada entre brazos de apoyo y cuerpo de la multiplicadora y brazos de apoyo y el bastidor.
 - Inspección de holguras en apoyos.
 - Inspección del deterioro de la goma de los *silentblocks* de los apoyos. Chequeo de posibles desgastes, grietas o incluso desplazamientos.
 - Inspección de fugas.
 - Inspección del interior de la multiplicadora.
 - Inspección visual. Decoloración, *pitting*, *stand still*, rotura de dientes, abrasión, etc.
 - Revisión del correcto funcionamiento del caudal de aceite.
 - Imán magnético incorporado en la multiplicadora o portátil para detectar partículas metálicas.
 - Endoscopia para acceder al detalle de la mayoría de los espacios entre dientes, rodamientos, etc., aunque no siempre es posible inspeccionar el 100% del interior de la multiplicadora por imposibilidad de acceso con el videoscopio a la totalidad de las zonas interiores [51].
 - Inspección del nivel de aceite. Para realizar esta comprobación es necesario esperar un tiempo adecuado para que el aceite que impregna los rodamientos y engranajes caiga a la zona baja de la multiplicadora (cárter).
 - Revisión (y sustitución si procede) de filtro de aire. En ciertos filtros es posible un chequeo de la pérdida de color del filtro como indicativo de deterioro de este (en ocasiones pasa de un color azul al principio de su vida útil a uno rosa al final).
 - Revisión de retenes. Deterioros, descolocación del retén o fugas son algunos aspectos para chequear.
 - Inspección de acoplamientos, tanto con el eje lento, como con unión cardán.
 - Chequeo de apriete de tornillería general, ya sea con aprietes o con revisión de marcado de la tornillería. Sujeción de filtros, radiadores, etc.
 - Chequeo de desperfectos en pintura del cuerpo de la multiplicadora o tornillería (habitual tras apertura de tapas de revisión).

- Sistema de lubricación.
 - Revisión (y sustitución si procede) de filtro de aceite.
 - Revisión (y sustitución si procede) de filtro de aceite off-line.
 - Purgado y comprobación de correcto funcionamiento del nuevo filtro.
 - Revisión de posibles ruidos anormales en el funcionamiento de la bomba de lubricación.
 - Revisión de la presión de aceite. Calibración del presostato.
 - Toma de muestra de aceite.
- Sistema de refrigeración.
 - Inspección de fugas.
 - Revisión de racores y latiguillos. Comprobación de ausencia de posibles roces con cantos vivos de latiguillos.
 - Inspección de contaminación y suciedad en el intercambiador de aceite.
 - Revisión de posibles ruidos anormales en el funcionamiento de los motores de ventilación.
 - Revisión de las lonas de evacuación desde los intercambiadores de calor al exterior de la góndola.
 - Chequeo de la temperatura registrada del aceite a través de la sonda de temperatura PT-100.
- Sustitución del aceite.
 - Con garrafas. Haciendo uso del polipasto se suben al aerogenerador las garrafas de aceite limpio y se van bajando por el mismo medio las de aceite usado. Tiene un menor coste inicial (la pérdida de producción y recursos personales serán diferentes en cada situación).
 - Con camión. Son camiones equipados con autobombas diseñados para la sustitución del aceite en altura. Tiene ventajas de reducción de tiempos y personal, así como de evitar riesgos de fugas de aceite.
 - Sustitución de aceite mineral por sintético. Para realizar esta tarea es necesario comprobar la compatibilidad de los aceites y llevar a cabo un flushing (limpieza) del interior de la multiplicadora una vez retirado el aceite usado. El objetivo del flushing es eliminar los restos indeseados que se quedan en el equipo y que pueden afectar a la operación del nuevo aceite, ya sean contaminantes como partículas oxidadas de aceite, barnices, polvo, partículas de desgaste o restos de aditivos [86]. Mientras el aceite mineral se obtiene a partir de la destilación y el refinamiento del petróleo, el aceite sintético se obtiene en un laboratorio mediante complejos procesos químicos para adaptarlo a las

necesidades de cada equipo [82]. El coste del aceite sintético es más elevado, pero los intervalos de sustitución son mayores y sus prestaciones operativas compensan este incremento en la inversión.

Según su relevancia, se utilizan otras técnicas para determinar el estado de la multiplicadora y evitar acciones correctivas [48]. Los más comunes son:

- La citada videoscopia, para observar directamente el estado de los componentes internos.
- Análisis de vibraciones, ya sea de forma ocasional o permanente.
- Análisis de aceite, con la doble función de establecer el estado de la multiplicadora y el propio aceite.

2.6.2. Averías y alarmas habituales

Las averías y alarmas más habituales de la multiplicadora suelen estar relacionadas con las condiciones de operación en que tiene que operar el aceite para que no pierda propiedades y proteja los componentes internos del aerogenerador [87]. Las alarmas más repetidas son las siguientes:

- Alta temperatura en rodamientos. Puede ser debido a causas como un bajo nivel de aceite, deficiencias en la circulación del aceite, deficiencias en el sistema de refrigeración del aceite, deterioro del propio aceite, defecto de algún componente del rodamiento o fallo en la lectura del sensor de temperaturas (PT-100).
- Señal de termostato de la temperatura de aceite fuera del rango establecido. Las altas temperaturas pueden tener su origen en un nivel bajo de aceite, defectos en la bomba de circulación o deficiencias en el sistema de refrigeración.
- Ruido inusual de la multiplicadora. Siempre que se cumplan las condiciones de seguridad para estar presente en la *góndola* mientras la multiplicadora gira, aunque sea a bajas revoluciones, si se detecta algún ruido anormal podría deberse a eventos como algún daño en los dientes de algún engranaje o en bolas o rodillos de algún rodamiento.
- Disparo de un térmico de un ventilador. Defecto en funcionamiento del ventilador.
- Disparo de un térmico de la bomba de circulación de aceite. Defecto en la bomba de circulación por motivos que habría que investigar.
- Fallo de detección de caudal. Posible bajo nivel de aceite, deficiencias en la bomba de circulación o filtro de aceite colmatado.

- Precalentamiento aceite multiplicadora.
- Temperatura de resistencia de caldeo fuera de los parámetros establecidos.
- Filtro de multiplicadora colmatado. Filtro saturado que necesitará sustitución. Es importante analizar el estado del filtro porque es probable que aporte información sobre daños mayores por suciedad en el aceite o desgaste de partículas metálicas procedentes de engranajes o rodamientos.
- Señal de presostato de la presión de aceite fuera del rango establecido. En este caso el origen puede estar en un bajo nivel de aceite, deficiencias en la bomba de circulación, filtro de aceite colmatado o deficiencias en la señal del propio presostato.
- Señal de confirmación de velocidad del caudal de refrigeración fuera del rango establecido.

2.6.3. Tomas de muestra

El análisis del aceite en los laboratorios se realiza en un ambiente extremadamente limpio y ordenado, por lo que la probabilidad de contaminación una vez que la muestra está en esta atmósfera es mínima [88]. Sin embargo, la situación al inicio del proceso, es decir, en el aerogenerador, o incluso en subestaciones o almacenes, es diferente. Es en esta etapa cuando el riesgo de contaminación de la muestra de aceite es mayor. Es determinante que las impurezas no entren en la botella de la muestra antes, durante o después de que se tome una muestra de aceite. Si hay impurezas presentes en la muestra, alterará los resultados, que en algunos casos serán detectados como erróneos y rechazados, pero en otros casos serán aceptados como un "falso positivo". Este proceso debe ser muy escrupuloso y por esta razón algunos protocolos implementados incluyen acciones como:

- La botella solo debe abrirse en el momento exacto de la toma de la muestra durante el período mínimo de tiempo que sea estrictamente necesario.
- El área circundante de la válvula de muestra debe estar lo más limpia posible.
- Deberá desecharse la cantidad de aceite igual a un volumen determinado indicado por los mantenedores y los laboratorios.
- La multiplicadora deberá haber estado girando o al menos la bomba del circuito de lubricación funcionando para que el aceite esté bien batido y la muestra sea representativa. Una vez que se pare no deberá pasar más de un periodo determinado (en torno a 15 o 20 minutos para tomar la muestra).

- Evitar que los botes de las muestras estén expuestos a la luz del sol o a temperaturas extremas. Cuando los botes son transparentes en ocasiones se incluyen botes o bolsas opacas para evitar que esto ocurra.
- Las muestras de aceite deberán enviarse a los laboratorios después de que se haya recogido la muestra en un plazo determinado estipulado por los mantenedores y los laboratorios.

2.7. Laboratorios

2.7.1. Descripción

No existe un criterio único a nivel mundial para poder instalar un laboratorio. Cada país tiene sus propias condiciones y requisitos para que un establecimiento sea considerado como laboratorio. Actualmente países como España e Italia son países con gran complejidad para lograr el estatus de laboratorio certificado, bajo el estándar ISO 17025, de análisis de aceites usados. En el otro extremo, Estados Unidos es uno de los países con menos dificultades para cumplir con la certificación y ser catalogado como laboratorio [89].

En Europa, la mayoría de los laboratorios comerciales están bajo la norma ISO 17025 [89], que da unas pautas, aunque no muy específicas, de cómo debe estar instalado y equipado un laboratorio. Así, los requisitos van a depender del tipo de análisis que se disponga, es decir, de los ensayos que se llevan a cabo. Por ejemplo, si como residuo del ensayo se volatiliza algún gas, será necesario disponer de una campana de extracción (o cámara) y a su vez esto implica contar con un sistema de extracción de gases. Si se generan residuos peligrosos, será obligatorio disponer de un área destinada a almacenarlos temporalmente de forma segura y garantizar que el proceso es absolutamente inofensivo para el medio ambiente.

En cuanto a la localización de los laboratorios, en algunos países se exige que los laboratorios que emiten gases provenientes de solventes deben estar a una determinada distancia de los núcleos de población, algo que ya ocurre con instalaciones que pueden contar con desechos tóxicos o contaminantes para el medio ambiente. No obstante, es muy frecuente en muchos países que la mayoría de los laboratorios estén dentro del perímetro urbano, lo que conlleva un cumplimiento estricto y cada vez más exigente de las condiciones de seguridad relacionadas con instalaciones, emisiones de gases, desechos, etc.

Respecto a los técnicos de los laboratorios, no existe un criterio común internacional en referencia a los requerimientos y certificaciones. Como buenas prácticas, en ocasiones se potencia las certificaciones del personal de cara al cliente y que esto sea una herramienta de venta al aportar robustez técnica, incluso se pueden incluir en licitaciones como una obligatoriedad. El coste de la certificación es elevado, tanto en costes como en tiempo de estudio y formación en horario laboral, de ahí que, en economías con una movilidad laboral mayor, sea más complicado disponer de un porcentaje elevado de la plantilla con estas certificaciones.

2.7.2. Parámetros analizados. Tipos de test

Los análisis primarios tienen como objetivo determinar las condiciones y propiedades del aceite en servicio y el impacto que estas puedan tener en el componente o sistema lubricado [90].

Este conjunto de test orientado a multiplicadoras por lo general cuenta mínimamente con:

- **Metales** (desgaste, contaminación y aditivación)

Elementos de desgaste. El origen del desgaste de algunos elementos puede tener un origen físico o uno químico: i) presencia de algunos aditivos, ii) componentes ácidos que se originan en la degradación del aceite, iii) contaminación del aceite y iv) altas temperaturas. Estos elementos de desgaste pueden ser: aluminio, cromo, cobre, plomo, hierro, molibdeno, níquel, estaño o plata proveniente de cojinetes, depósitos, tuberías o engranajes.

Elementos contaminantes. Entendiendo como contaminantes a todas las sustancias extrañas que contiene el aceite, bien sean generadas por el propio aceite o bien ingeridas por el sistema.

Los contaminantes pueden ser muy nocivos para las prestaciones del aceite. Una de las consecuencias de las condiciones de operación de alta temperatura y presión a las que está sometido el aceite de la multiplicadora es que los contaminantes se mezclan y reaccionan, degradando el aceite y agotando los aditivos. La presencia de elementos de desgaste y contaminantes puede provocar un aumento en la temperatura del aceite, agotamiento de los aditivos antidesgaste, *micropitting*, aumento de la abrasión y reducción en la vida útil de la multiplicadora.

El origen de esta contaminación suele estar en sellados deficientes, mala manipulación al operar el aceite, exceso de aditivos antiespumante, etc. lo que provoca la entrada de polvo, refrigerante, etc. Y el aumento de componentes como el boro, potasio, sodio o silicio.

Aditivos. Son componentes que se añaden al aceite base para mejorar sus propiedades. La caída de concentración de estos, dan una idea del deterioro de las propiedades del lubricante. Algunos ejemplos serían:

- Bario, actúa como aditivo detergente, reduciendo la tensión interfacial entre el aceite y el contaminante, permitiendo que el contaminante sea desplazado de la superficie del metal. Esta capacidad detergente irá disminuyendo con el paso del tiempo al aparecer sustancias ácidas que van siendo neutralizadas por los detergentes. También puede darse en altas proporciones como fuga de refrigerante.
- Calcio, actúa como aditivo dispersante. La dispersancia es la capacidad del aceite para mantener dispersos los residuos a lo largo del circuito, evitando que se acumulen. Esta

capacidad va perdiéndose con el uso, debido a la acumulación de contaminantes dispersos en el aceite

- Magnesio, actúa como aditivo detergente (capacidad para limpiar y disolver suciedad en el circuito hidráulico) y dispersante.
 - Fósforo, es uno de los principales aditivos y es utilizado para prevenir la corrosión dentro del multiplicador. También protege las superficies de los componentes contra el desgaste y las presiones extremas que sufren los componentes. La disminución paulatina de los niveles de fósforo es una tendencia normal. No obstante, si se produce una caída mayor de los niveles de fósforo, algunos componentes como los dientes de los engranajes pueden sufrir rozaduras, por lo que es necesaria una actuación inmediata.
 - Zinc, actúa como aditivo antioxidante. También puede aparecer como consecuencia de desgaste en los cojinetes de latón. El aumento paulatino de los niveles de zinc es una tendencia normal.
- **Viscosidad** (40°C o 100°C - pueden ser ambas e incluir el índice de viscosidad)

La viscosidad es la principal característica de un aceite lubricante y su valor debe estar dentro de unos valores muy estrictos ($\pm 10\%$ respecto al aceite nuevo) con el objeto de preservar los distintos elementos de la multiplicadora de todo tipo de problemas.

En el caso de un deterioro de la viscosidad, este fenómeno puede ser debido a varios factores: i) oxidación excesiva: ya sea debido a un envejecimiento extremo o bien una causa química, el aceite puede haber incrementado su viscosidad hasta valores fuera de lo normal, poniendo en riesgo la característica funcional del componente lubricado o ii) contaminación con un fluido de menor viscosidad: debido a prácticas inadecuadas o carencia de políticas de control de calidad, en algunas ocasiones se añaden aceites de menor viscosidad o aceites hidráulicos a la multiplicadora. En ambos casos se reduce la viscosidad produciéndose un decremento de la película lubricante y posterior contacto metal con metal entre las superficies móviles. En ambos escenarios será necesaria la sustitución, al menos parcial (al reemplazar parte del aceite la viscosidad se acercará a los valores recomendables del mismo y la cantidad exacta vendrá impuesta por el suministrador del aceite [normalmente se encuentra entre 50 y 250 litros de los cerca de 400 litros aproximados totales]) o totalmente del aceite.

El aumento de la viscosidad se debe principalmente a presencia de insolubles y a cambios de temperatura que, aunque como norma general, a mayor temperatura habrá menor viscosidad y viceversa (dentro de unos rangos aceptables de temperatura), si la multiplicadora hubiera estado operando a bajas temperaturas o sin operar en un largo periodo de tiempo, podría aparecer una condensación de agua. En el primer caso, puede ser debido a que los calentadores no están funcionando correctamente, por tanto, será importante analizar los datos de scada para comprobar el histórico de esta temperatura. Por otro lado, si el aceite ha estado operando a altas temperaturas (también puede ser comprobado en los datos del scada) se producirá un aumento

de la viscosidad. En este segundo caso, el aumento sería debido a un fenómeno de oxidación al reaccionar el oxígeno con el aceite (oxidación).

La disminución de la viscosidad puede ser debida a: i) dilución con un combustible líquido o ii) debido a la composición del aceite, el cual está compuesto por un porcentaje de la base del aceite de alta viscosidad y otro porcentaje de baja viscosidad. En ocasiones, el pequeño porcentaje de alta viscosidad puede sufrir una descomposición provocando un descenso de un 10% aproximadamente de viscosidad.

Cuando la viscosidad es baja, se produce una reducción o rotura en la película del aceite, favoreciendo la propagación de fisuras y desgaste en los componentes de la multiplicadora.

En el caso de una viscosidad alta, el espesor de la película del aceite es mayor, incrementado la protección ante posibles defectos por *micropitting*. No obstante, esta viscosidad no debe ser demasiado alta ya que favorecería otros procesos como la cavitación (succión y bombeo del aire, causando desgaste), mayor consumo de energía o un mayor arrastre de residuos. Adicionalmente hay que tener en cuenta que la influencia de los aditivos (especialmente el calcio y el zinc) puede aminorar el efecto de la viscosidad, por lo que, a pesar de una alta viscosidad, no se conseguiría eliminar el efecto de protección ante el *micropitting* cuando el aceite contenga una proporción agresiva de aditivos.

- **TAN**

El Tan, acidez (índice de neutralización) del aceite es una medida de los constituyentes o contaminantes ácidos del aceite y es debida a la formación de productos de oxidación ácidos. La naturaleza química del aceite permite neutralizar los productos ácidos que se forman en el circuito y que pueden atacar las piezas lubricadas. Por esta razón la velocidad de incremento de la acidez del aceite es uno de los síntomas más utilizados para determinar la degradación de este.

- **FTIR (*Infrared Analysis*; Análisis Infrarrojo)**

Cuando los compuestos orgánicos, como los aceites lubricantes, se exponen a la luz infrarroja, las sustancias presentes dentro del compuesto absorberán la luz en longitudes de onda específicas. La cantidad de absorbancia en una longitud de onda particular está relacionada tanto con el tipo como con la cantidad de material absorbente. De esta manera, ciertos contaminantes y cambios físicos en el lubricante se pueden medir directamente de acuerdo con un espectro molecular. También se puede detectar contaminación por glicol (refrigerante), sulfatos, cambios de ácidos y bases, así como ciertos aditivos, junto con una gama extremadamente amplia de compuestos orgánicos.

- **Agua y Aire**

La presencia de agua en el aceite es otra de los causantes de degradación en el mismo. El aumento de agua en el aceite es fácilmente identificable al tornarse nebuloso y perder transparencia. También se podrá detectar por una rápida degradación del filtro de aire.

En otros casos deteriora el aceite hasta adquirir un aspecto lechoso y brumoso (incluso se puede detectar en el visor del nivel de aceite durante inspecciones rutinarias). Este aspecto es debido a la entrada de aire, mezcla con el aceite y descomposición del resto de aditivos. Esto ocurrirá en caso de daño de alguna junta que provoque que la bomba succione aire hacia el interior del multiplicador. Normalmente la composición del aceite liberará el aire, pero se pueden provocar daños por la suciedad y partículas que acompañan a ese aire y bloqueos de los filtros.

La presencia de agua provoca corrosión en los distintos componentes, y reducción de la vida útil, tanto del aceite, como de los cojinetes y el resto de los componentes de la multiplicadora.

- **PQ**

El PQ es un equipo que determina un índice de las partículas de desgaste ferrosas en muestras de aceite. Es una buena técnica para determinar las partículas de tamaño grande que por otras técnicas no es posible determinar. Como resultado se proporciona Índice PQI.

Este PQI es una medida adimensional que puede mostrar la tendencia, con una linealidad aceptable en un amplio rango, del contenido en partículas ferrosas y sus tamaños en muestras de lubricante.

La medida del PQI es una herramienta esencial en el programa de análisis de aceites usados ya que puede identificar partículas ferrosas de tamaño mayor a 5-10 μm , que por otras técnicas analíticas no es posible sin preparación de la muestra.

La medida del PQI responde solo a la presencia de componentes ferromagnéticos. Además, puede ser útil para poder identificar la rotura de los filtros debido a la presencia de partículas de tamaño grande.

3. ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE PUEDEN ALTERAR LOS RESULTADOS DE LAS ANALÍTICAS DE ACEITE DE UNA MULTIPLICADORA

A continuación, se analiza la información intercambiada entre distintas empresas [5] y laboratorios [14], detallando situaciones que pueden afectar a los resultados y cómo este conocimiento podría ser utilizado para predecir algunos eventos con antelación, con el fin de completar el estudio necesario para proponer una plantilla que proporcione información detallada a los laboratorios para mejorar las conclusiones, recomendaciones y planes de acción.

Posteriormente se describen siete ensayos diferentes que se han llevado a cabo en un total de 40 aerogeneradores en siete parques eólicos independientes. Las diferentes tecnologías de los aerogeneradores, de los mantenedores y de los laboratorios que han formado parte del estudio proporcionan una imagen completa de los aspectos relacionados con la operación y mantenimiento de un aerogenerador con relación al aceite de la multiplicadora, incluido el análisis de los efectos de las diferentes acciones en el estado del aceite y su impacto en los resultados de las analíticas. Entre las diferentes acciones que se realizan en la operación y mantenimiento de un aerogenerador con posible afección al estado del aceite de la multiplicadora, las seis con mayor relevancia son: i) fugas y relleno de aceite, ii) sustitución de aceite de marca (y características), iii) instalación de filtro portátil offline, iv) alta temperatura del aceite y sustitución de válvulas termostáticas, v) posición donde se ha tomado la muestra y vi) sustitución de filtros de aire de reducción de agua. Por último, se analiza la prognosis de las incidencias en multiplicadoras, es decir, el conocimiento anticipado al suceso, analizando los valores previos al daño, una vez ocurrido el incidente relevante como la sustitución de engranajes, rodamientos o la sustitución de la multiplicadora. A continuación, se proporciona un análisis detallado de las actuaciones mencionadas, dedicando una sección a cada una de ellas.

3.1. Datos de entrada de las analíticas de aceite en la actualidad

En los últimos años, la mejora en las propiedades y fiabilidad del aceite ha ampliado los tiempos de degradación y ha contribuido a una mejor adaptación a las condiciones específicas de las multiplicadoras de los aerogeneradores [91]. Además, los avances en laboratorios conllevan mejores y más fiables resultados. Incluso el conocimiento de la analítica de aceite de las multiplicadoras y los errores más comunes se han ido puliendo.

Gran parte de la información relevante proviene directamente de las empresas o laboratorios involucrados en este sector. Sin embargo, la comunicación entre el parque eólico (muestreo) y el laboratorio (análisis) sigue contando con deficiencias que tienen importantes implicaciones. En el análisis de los parámetros del aceite de la multiplicadora no sólo las tendencias son importantes, sino también la relación entre esos parámetros. Esta "brecha" en

la comunicación afecta a la interpretación de los resultados y sus conclusiones, desencadenando conclusiones genéricas que pueden contener varias opciones, no identificar problemas graves específicos o simplemente ser erróneas, lo que puede conllevar graves consecuencias.

Para comprobar que el aceite mantiene las propiedades en un estado óptimo, se llevan a cabo analíticas que proporcionan información sobre el estado del lubricante, el entorno operativo (entorno en el que opera el aerogenerador) y el estado de la multiplicadora (desgaste interno del equipo).

El estado del aceite se determina comprobando su contaminación y degradación [92], es decir, la pérdida de capacidad lubricante causada por una variación de sus propiedades físicas y químicas (especialmente las de sus aditivos). La contaminación del aceite se puede determinar cuantificando en una muestra del lubricante el contenido de partículas metálicas, la proporción de agua, los materiales carbonosos y las partículas insolubles, es decir, todo lo que está en el fluido y no pertenece a él (Tabla1). La degradación se puede evaluar midiendo la viscosidad, la detergencia, la acidez y la constante dieléctrica [93].

Tabla 1. Parámetros estándar utilizados en el análisis de aceite de la multiplicadora.

Condición del aceite	Aditivos	Elementos de desgaste	Elementos contaminantes
Viscosidad a 40°C	Bario	Aluminio	Boro
Recuento de partículas	Calcio	Cromo	Potasio
Código ISO (4/6/14)	Magnesio	Cobre	Sodio
Índice PQ	Fósforo	Hierro	Silicio
Acidez	Zinc	Molibdeno	
Agua		Níquel	
Apariencia		Plomo	
Nitración		Estaño	
Oxidación		Plata	

Es conveniente indicar que la contaminación y la degradación no son fenómenos independientes, ya que la degradación puede aumentar la contaminación y, a su vez, la contaminación en el aceite tiene un efecto directo sobre la degradación [91]. Sin embargo, estas consecuencias serán diferentes dependiendo del tipo de degradación:

- i) La oxidación y el agotamiento del aditivo acaban generando depósitos que pueden restringir el flujo a los rodamientos, produciendo un mayor desgaste de los dientes de los rodamientos y engranajes.
- ii) Cuando los sedimentos o partículas metálicas se hacen más grandes, pueden producirse daños en los rodamientos y engranajes de la multiplicadora. Estas partículas pueden erosionar la capa externa de estos elementos, creando un punto débil y posibles daños

mayores en el futuro. La razón es que es la capa externa es la más dura (el resto del material en su interior es más dúctil).

- iii) El desgaste de los aditivos reduce la capacidad del aceite para proteger los rodamientos y engranajes.

El contenido de la información que acompaña a cada estructura de muestra de aceite puede ser definido por dos actores: el mantenedor y el laboratorio. Teniendo en cuenta que hay diferentes laboratorios [14] y mantenedores [5], independientes entre sí, y que no existe ninguna obligatoriedad sobre el contenido de la información que se debe compartir, la consecuencia es que ésta no está estandarizada.

Históricamente las etiquetas que acompañan a la botella con la muestra contenían poca información. A pesar de que la situación ha ido mejorando en los últimos años y cada vez se incluyen más detalles en la documentación que acompaña a la muestra de aceite, siguen existiendo en la actualidad diferentes situaciones en el funcionamiento de un parque eólico que prácticamente nunca se reflejan en la información recibida por el laboratorio.

En las Tablas 2 a 8 se recoge la información real que ocho de los mantenedores y laboratorios más relevantes del sector a nivel mundial comparten en sus muestras de aceite. Estas tablas recogen la información de los diferentes campos que tienen relevancia para el laboratorio a la hora de disponer de una información básica de identificación y trazabilidad de la muestra, así como para alcanzar sus conclusiones sobre los resultados de las analíticas. La información se divide en: (i) parque eólico, (ii) aerogenerador, (iii) multiplicadora, (iv) lubricante, (v) protocolo de la muestra, (vi) trazabilidad y (vii) comentarios o notas.

Tabla 2. Contenido de las etiquetas de la muestra de aceite de ocho de los principales mantenedores y laboratorios relativos al parque eólico. Esta tabla incluye la información necesaria para identificar el parque eólico y su propietario.

	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
Asunto								
Nombre				✓		✓		
Localización	✓			✓				
País	✓			✓				
Propietario	✓							✓
<i>Offshore</i>				✓				

En este caso, la mayor parte de la información son datos formales utilizados para reconocer y clasificar la muestra. En una gran parte de los casos se ignora esta información y se hace referencia directa a la muestra con el aerogenerador (Tabla 3) o la multiplicadora (Tabla 4). En

el caso del campo “*offshore*”, aunque solo una empresa lo solicite, es importante detectar si la turbina está instalada en el mar (*offshore*), debido al incremento de los costes en las acciones correctivas, especialmente en las sustituciones del componente y a la singularidad de las condiciones atmosféricas del entorno. Si el laboratorio está familiarizado con este tipo de situaciones, pueden ser más estrictos con las posibles acciones de seguimiento.

Tabla 3. Contenido de las etiquetas de la muestra de aceite de ocho de los principales mantenedores y laboratorios, incluida la información técnica relevante del aerogenerador.

	Asunto	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
Aerogenerador	Marca (plataforma)		✓	✓	✓	✓		✓	✓
	Modelo		✓		✓	✓			✓
	Número de serie		✓	✓	✓	✓		✓	✓
	Identificación de referencia		✓	✓	✓	✓			
	Horas de funcionamiento			✓					
	Producción			✓					
	Número instrucción de trabajo	✓							

En esta ocasión hay una parte de la información relacionada con los datos formales del aerogenerador y sus registros operativos. Registrar las horas de operación es importante en el caso de sustitución del aerogenerador, que no es común, pero sí posible.

Dependiendo de la organización interna, es importante incluir la instrucción de trabajo para vincular este registro interno de la compañía mantenedora con la muestra tomada. No obstante, únicamente se incluye en uno de cada ocho casos.

Tabla 4. Contenido de las etiquetas de la muestra de aceite de ocho de los principales mantenedores y laboratorios, incluida la información técnica relevante de la multiplicadora.

	Asunto	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
Multiplicadora	Marca	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
	Modelo		✓	✓	✓	✓			
	Número de serie	✓	✓	✓		✓		✓	✓
	Capacidad (litros)			✓	✓	✓			✓
	Horas de funcionamiento	✓			✓	✓	✓	✓	✓

Este es el campo donde existe una mayor uniformidad, debido a que esta información es clave para identificar el componente del cual se va a realizar el estudio. La capacidad de aceite en la multiplicadora es clave para estimar cómo la contaminación externa puede alterar los

resultados, ya que, frente a una misma cantidad de contaminación, una menor cantidad total de aceite en la multiplicadora provocará que la proporción y por tanto el efecto sea mayor (y viceversa). La información relativa a las horas de funcionamiento permite conocer si la multiplicadora ha sido sustituida y se debe reiniciar el histórico de datos.

Tabla 5. Contenido de las etiquetas de la muestra de aceite de ocho de los principales mantenedores y laboratorios con respecto al lubricante. En esta tabla se incluyen los datos identificativos del aceite y algunos aspectos operativos.

	Asunto	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
Lubricante	Marca	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Horas de lubricante (fecha del último cambio de aceite)	✓			✓	✓	✓	✓	✓
	Primer análisis después de la sustitución de aceite (o nuevo)				✓				✓
	Relleno (litros)			✓	✓	✓		✓	✓
	Sustitución del filtro de aceite (antes de la muestra)			✓		✓		✓	✓

La información incluida aquí también reúne un consenso importante en algunos casos. Sin embargo, información como el relleno de aceite, la sustitución del filtro de aceite o el aviso de la sustitución del lubricante no es unánime en todos los casos, a pesar de su importancia.

Tabla 6. Contenido de las etiquetas de la muestra de aceite de ocho de los principales mantenedores y laboratorios en cuanto al protocolo de la muestra, es decir, la posición de la muestra tomada.

	Asunto	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
Muestra	Protocolo (posición de la muestra)	✓							

Sólo uno de cada ocho casos registra esta información, a pesar de que, como quedará demostrado en la sección 4.5, la diferente posición de la toma de la muestra puede alterar los resultados y por lo tanto las conclusiones.

Tabla 7. Contenido de las etiquetas de la muestra de aceite de ocho de los principales mantenedores y laboratorios en cuanto a trazabilidad, con las diferentes opciones para comprobar la información de las muestras anteriores.

	Asunto	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
Trazabilidad	Fecha de muestra	✓			✓		✓	✓	✓
	Referencia de la última muestra			✓	✓		✓		✓
	App				✓			✓	✓
	Código de barras/Código QR				✓		✓	✓	✓

La evolución de la trazabilidad ha mejorado en los últimos años, haciéndose cada vez más presente. Las nuevas tecnologías en general, como el uso de teléfonos inteligentes, aplicaciones ad-hoc o productos como los códigos QR [94], han dado soporte en esta evolución. Sin embargo, no en todos los casos existe una buena trazabilidad de la analítica en diferentes momentos, lo que dificulta el análisis de las tendencias históricas de los diferentes parámetros.

Tabla 8. Contenido de las etiquetas de la muestra de aceite de ocho de los principales mantenedores y laboratorios con respecto a otros comentarios o notas para agregar información complementaria.

	Asunto	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
Comentarios	Notas/Comentarios	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	Contacto								

Por último, en la mayoría de los casos, existe la opción de anotar comentarios adicionales no incluidos en el resto del documento.

En estas ocho tablas se puede observar que, a pesar de la existencia de algunos puntos comunes, no existe normalización en ningún ámbito, incluso en muchos casos la información reportada es muy escasa. Adicionalmente, esta información registrada no incluye aspectos relacionados con las acciones operativas que puedan alterar los resultados y recomendaciones. Incluso hay algunos casos en los que se puede obtener alguna información relevante para compararla con muestras anteriores, pero no se destacan aspectos importantes y pueden pasar desapercibidos.

Teniendo en cuenta esta situación de ausencia de información importante en muchos casos, las respuestas y conclusiones pueden verse afectadas, provocando respuestas: (i) poco concretas, con diversas opciones, (ii) erróneas o (iii) con cuestiones no identificadas. Por lo tanto, esta afección en las conclusiones alterará de forma similar a las recomendaciones del laboratorio. En muchas ocasiones las conclusiones se centran en el efecto directo sobre el aceite, ya sea en aditivos, elementos de desgaste u otros, pero no tanto en el origen de ese efecto, en

lo que lo ha provocado o en las recomendaciones. Como ejemplos de tipo de conclusiones estándar de una analítica de aceite, se pueden diferenciar las siguientes:

- Efecto sobre el aceite:
 - El silicio es significativamente alto.
 - Alto número de partículas ferromagnéticas.
 - Contenido de cobre ligeramente alto.

- Posibles causas:
 - Desgaste en cojinetes, anillos de bronce o tuberías.
 - Absorción de agua durante el almacenamiento de aceite o contaminación interna.
 - Mezcla de lubricantes o contaminación externa.
 - Fallos de la bomba o problemas de corrosión.
 - Partículas de desgaste, obstrucción del sistema de filtración o contaminación externa.

- Recomendaciones:
 - Revisar el sistema.
 - Comprobar la referencia del aceite.
 - Monitorear la evolución.

3.2. Caso 1. Fugas y relleno de aceite

Las multiplicadoras están equipadas con numerosas juntas, sellados, válvulas o filtros donde pueden producirse fugas de aceite [95], ya sea por deterioro en cualquiera de los componentes, desajustes o incluso errores humanos en la manipulación.

Cuando aparece una fuga en una multiplicadora, se produce una pérdida de volumen de aceite, lo que genera un aumento de la temperatura y la degradación del aceite debido a un alto nivel de estrés. Cuando el aceite está en niveles mínimos, se produce una alarma de advertencia o incluso una parada del aerogenerador con el fin de evitar trabajar en condiciones de riesgo que puedan dañar el equipo. Para evitar esta situación, la práctica habitual es aumentar el nivel de llenado con aceite nuevo, obviamente con propiedades intactas, lo que produce una contaminación (positiva en este caso) que altera la evolución de los resultados de los análisis de aceite anteriores.

Desde el punto de vista del mantenimiento, esta situación debería ser algo excepcional y no rutinaria porque tendría tres consecuencias: i) si aparece una fuga, las buenas prácticas indican que ésta debe ser reparada y no llevar a cabo únicamente limpieza exterior, de lo contrario seguirá goteando permanentemente, ii) no se dispondrá de análisis fiables porque el aceite siempre tendrá nuevos rellenos, enmascarando el estado real, no solo del aceite, sino también de los rodamientos y dientes de engranajes y iii) la evolución de las tendencias de los diferentes análisis no tendrían ningún valor ya que no pueden comparar la evolución de los diferentes elementos (aditivos, partículas de desgaste, viscosidad, agua, etc.). Si no hay información fiable que advierta de situaciones de riesgo, no se puede tomar ninguna medida o quizás se tomen medidas erróneas o innecesarias.

3.3. Caso 2. Sustitución del aceite y de marca

Cuando el mantenedor sustituye el aceite (y sus características), ya sea por una decisión técnica sobre las características del aceite usado o simplemente porque ha llegado al final de su vida útil, es posible que la marca de aceite cambie.

Al reemplazar el aceite de una multiplicadora para una marca diferente, es necesario llevar a cabo las siguientes acciones:

- Retirar del aceite usado.
- "Lavar" con aceite nuevo. Esta tarea no siempre se ejecuta y depende de la decisión del mantenedor de hacerlo o no. Esta acción busca una mejor eliminación de los restos del aceite anterior, ya que la configuración de la multiplicadora con muchos engranajes y cojinetes (con pequeños agujeros de difícil acceso) hace prácticamente imposible la eliminación total.
- Reemplazar del filtro de aceite.
- Enjuagar para eliminar todos los rastros del aceite retirado. Esta operación busca eliminar la máxima cantidad de aceite y restos de suciedad con aire comprimido.
- Rellenar con aceite nuevo.

Aunque la mayoría de los componentes de los aceites para multiplicadoras son los mismos, el porcentaje de aditivos puede variar o incluso puede contener algunos diferentes. En este caso, se produce una alteración en la secuencia de valores de la serie de resultados históricos a partir de análisis de aceite que podría afectar a su interpretación, provocando la repetición de muestras o análisis e incluso la aplicación de acciones innecesarias en la multiplicadora, lo que puede implicar inversiones relevantes. Si aparece una advertencia falsa, se requerirían nuevas acciones innecesarias, como endoscopias o análisis de vibraciones [48].

En el primer caso, se utiliza un videoscopio para inspeccionar el detalle de los rodamientos y engranajes de la multiplicadora. Estos trabajos deben ser ejecutados por un experto, no solo por las habilidades necesarias para introducir el videoscopio a través de pequeños huecos, sino también por la experiencia necesaria para interpretar las imágenes capturadas. La duración de estos trabajos puede ser de alrededor de cinco horas, lo que implica un coste significativo, teniendo en cuenta el desplazamiento, el coste del trabajo, los recursos del mantenedor para dar soporte al videoscopista y la pérdida de producción asociada.

En cuanto al análisis de vibraciones, que analiza las frecuencias de fallo de los rodamientos, es necesario conocer los datos de frecuencia de los diferentes rodamientos. En algunos casos, este equipo se instala en el aerogenerador de forma permanente, mientras que, en los otros casos, se utiliza un equipo portátil. La condición más importante para lograr resultados confiables es ejecutar la prueba con un valor mínimo de velocidad del viento (alrededor de 7 m/s) y respetar las normas de seguridad que, salvo en excepciones muy concretas, no permitirán estar en la góndola con el aerogenerador operando, por lo que el proceso consiste en: i) detener el aerogenerador, ii) instalar el equipo, iii) salir del aerogenerador, iv) hacer funcionar la multiplicadora durante un determinado periodo de tiempo que vendrá marcado por el experto y que puede oscilar desde dos horas hasta varios días, v) detener el aerogenerador, vi) retirar el equipo, y vii) reiniciar el aerogenerador. En este caso, también es necesaria una inversión relevante.

3.4. Caso 3. Instalación de filtro off-line portátil

La mayoría de las multiplicadoras de aerogeneradores multimegavatios disponen de un filtro de aceite. Además, puede haber un segundo equipo llamado filtro offline, que proporciona un filtrado de mayor calidad. El esquema para el equipo de filtración de aceite offline de la multiplicadora se muestra en la figura 2.

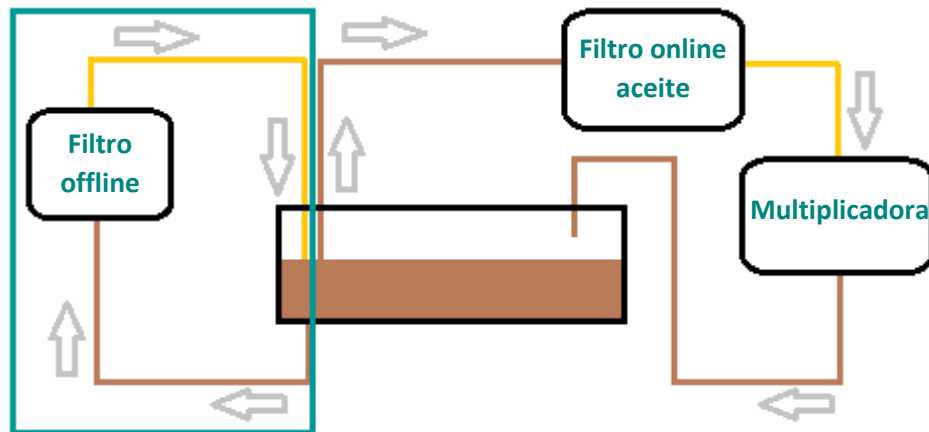


Figura 2. Esquema del filtrado offline de la multiplicadora de un aerogenerador.

Este tipo de filtro se puede instalar de forma permanente o temporal con el fin de mejorar las propiedades del aceite. El propósito de la instalación del filtro offline es reducir: i) el nivel de humedad a alrededor del 50%, ii) la concentración (ppm) de cobre (Cu) y hierro (Fe) en un 30%, iii) la concentración (ppm) de partículas de silicio (Si) (no en el caso de las uniones de silicio), iv) el nivel de partículas por cada 100 mL (Tabla 9) y v) el nivel del índice PQ (partículas ferromagnéticas) y pequeñas partículas de desgaste.

Tabla 9. Extracto de la norma internacional ISO 4406:1999 que establece la relación entre los recuentos de partículas y la contaminación por aceite (cuantificando los niveles de contaminación por partículas de fluido por mililitro en tres tamaños: 4 μm , 6 μm y 14 μm y codificando el nivel de contaminación con tres números (ejemplo: 17/15/12)).

ISO 4406/99		
Máximo número de partículas/100 mL		
Desde	Hasta	Clase
---	---	---
250000	500000	19
130000	250000	18
64000	130000	17
32000	64000	16
16000	32000	15
8000	16000	14
---	---	---

En el caso de un filtro offline, la presión y el flujo son bajos y constantes, a diferencia del filtro online, donde son altos y fluctuantes. Esto implica que la retención de partículas es mayor y, en consecuencia, la filtración es más efectiva.

En el caso de los filtros offline permanentes, el efecto positivo es continuo y estable en el tiempo, pero en el caso de los equipos portátiles, la mejora se hace evidente al comparar los resultados del análisis de aceite antes y después de su instalación. Este tipo de acciones de filtrado portátil es una solución económica para mejorar la calidad del aceite en un parque eólico con uno o varios equipos, en lugar de instalar un filtro permanente en cada aerogenerador. Como se explica en la introducción del punto 3. *Análisis datos de entrada de las analíticas de aceite en la actualidad*, la contaminación en el aceite tiene un efecto directo en la degradación, por tanto, la instalación de este tipo de filtro mejora la limpieza del aceite y la protección de la multiplicadora.

En cuanto al nivel de contaminación del aceite, la mejora del nivel de partículas dependerá del nivel de contaminación y del tiempo de utilización, pero puede estar en una mejora en torno a las dos clases ISO 4406/99 (Tabla 9).

3.5. Caso 4. Alta temperatura del aceite y reemplazo de válvulas termostáticas

La temperatura del aceite es monitorizada continuamente. Estos valores deben estar en un rango de temperatura determinado por el fabricante para evitar degradaciones debidas a procesos térmicos. Las termoválvulas proporcionan un control fiable de las temperaturas del fluido para mantener la temperatura del aceite en estos rangos de funcionamiento predefinidos.

La mayoría de los aerogeneradores tienen niveles de alerta (que no suele parar el aerogenerador) y peligro (lo que generalmente implica la parada del aerogenerador). En el primer caso, el aerogenerador no se detiene, pero debe ser atendido, ya sea localmente o en remoto, y en su caso reparado. Adicionalmente, el análisis predictivo de temperaturas puede detectar si una o varias temperaturas del aceite de diferentes aerogeneradores del mismo parque eólico no están alineadas con la media del resto (cuando existe una población importante de unidades), detectando una anomalía que debe ser atendida.

Las termoválvulas están en el circuito de enfriamiento del aceite y sus piezas internas están en contacto permanente con el aceite. En ocasiones es necesario sustituir una de estas termoválvulas porque algunas piezas sufren degradación y el funcionamiento del componente es en consecuencia deficiente. Cuando esto ocurre, los nuevos dispositivos contienen niveles superiores de hierro y cobre en su composición, por lo que el aceite sufre indirectamente un aumento en los niveles de estos componentes de desgaste y así se refleja en los resultados de los análisis del aceite.

3.6. Caso 5. Posición de la toma de muestra

La posición de la toma de la muestra suele estar determinada por: i) el procedimiento de cada mantenedor, ii) el diseño de la multiplicadora, y iii) los propios conocimientos técnicos del mantenedor y la idoneidad de tomar la muestra en una posición u otra en función de criterios técnicos o ergonómicos. La muestra debe tomarse en la misma posición, pero debido a diferentes circunstancias, esto no siempre ocurre. La figura 3 muestra diferentes opciones para las posiciones de muestreo.

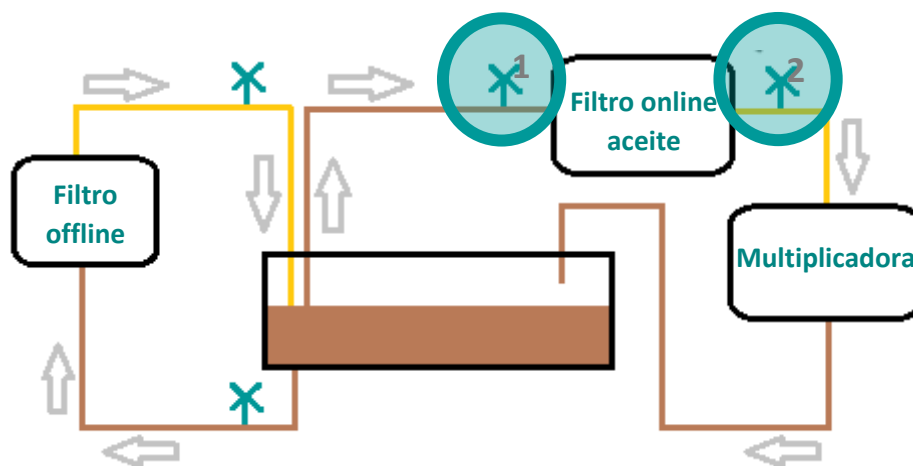


Figura 3. Opciones de posición de muestreo: opción 1, cuando el muestreo se realiza antes del de filtro de aceite y opción 2, cuando el muestreo se realiza después del filtro de aceite.

Si la muestra se toma antes del filtrado (figura 2, opción 1), se prioriza el conocimiento del estado de la multiplicadora. Por el contrario, si se toma después del filtro (figura 2, opción 2), se prioriza la condición del aceite, ya que le filtro contendrá parte de los posibles elementos de desgaste de componentes internos de la multiplicadora. Los resultados normalmente deben mejorar con nuevos filtros, pero se pueden obtener perturbaciones significativas si el filtro está sucio, de ahí que la condición del filtro también sea relevante.

En este caso, dependiendo de la posición del muestreo, las consecuencias pueden ser diferentes: desde la necesidad de la sustitución del filtro hasta acciones como las videoscopias o el análisis de vibraciones. En muchos casos, estas acciones predictivas implican el cambio de un rodamiento específico, con el fin de evitar la sustitución de la multiplicadora completa.

3.7. Caso 6. Sustitución de filtros de aire

La presencia de agua en el aceite es otra de las causas de su degradación. Los efectos de degradación eran muy agresivos hace una década, pero en la actualidad las propiedades químicas del aceite han experimentado grandes mejoras y los aceites de multiplicadora de hoy

en día pueden contener mucho más contenido de agua, ya que su punto de saturación es muy alto. No obstante, la presencia de agua provoca corrosión en los diferentes componentes y una reducción en la vida útil del aceite, los rodamientos y otros componentes de la multiplicadora. El siguiente gráfico (figura 4) muestra cómo cuanto más seco (libre de agua) esté el aceite, mayor será la vida útil del rodamiento [96].

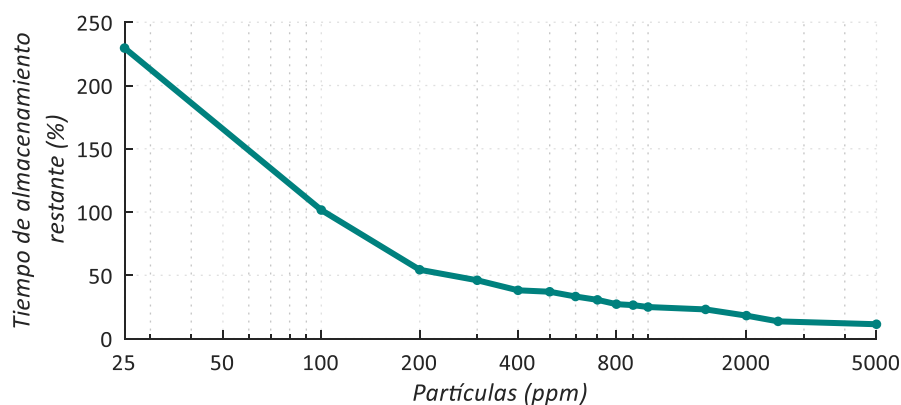


Figura 4. Relación entre el agua y la vida del rodamiento. Basado en el almacenamiento del 100% con agua de 0.01%/100 ppm en el aceite [26].

Las principales causas del aumento del porcentaje de agua en los resultados de los análisis pueden ser:

- Condensación de agua debido a un funcionamiento a baja temperatura (posible defecto en los calentadores de la multiplicadora) o períodos de apagado prolongados. En este caso el agua se encuentra generalmente en concentraciones por debajo de 300 ppm. Sería extraño que la condensación alcance valores más altos, a menos que la multiplicadora se encuentre abierta, sin filtro, etc.
- Filtración de agua durante la manipulación o por la introducción errónea de nuevo aceite en la multiplicadora que provoca mezclas de diferentes aceites, incluido el aceite hidráulico (también utilizado en otros componentes del aerogenerador).
- Posible error por contaminación por humedad en el bote donde se recoge la muestra. Esta situación es bastante frecuente cuando se ha producido un aumento de la presencia de agua. A veces el protocolo de muestreo no se sigue escrupulosamente y la muestra se recoge provisionalmente en botellas de agua que no están completamente secas. Posteriormente se transfieren a la botella final con ese porcentaje de agua mezclada con el aceite destinado a la muestra.

Cuando se produce una de estas situaciones, se puede utilizar un filtro especial para disminuir la presencia de agua en el aceite y evitar su degradación. Este filtro está diseñado específicamente para separar el agua a través de una reacción superabsorbente con el agua presente en el aceite, convirtiéndose en un gel. Estas partículas de gel sólido se recogen en este filtro, reduciendo el contenido de agua en el aceite [97].

3.8. Prognosis de la multiplicadora

La prognosis se puede definir como el conocimiento anticipado de un acontecimiento [98]. A pesar de ser un concepto que se utiliza más típicamente en otros sectores como la medicina o las predicciones meteorológicas, también tiene su importancia y utilidad en la ingeniería en general, y en el análisis de aceite de las multiplicadoras en particular [99].

El estudio de esta tesis trata de analizar los valores previos al daño, una vez ocurrido un incidente relevante como la sustitución de engranajes, rodamientos o la sustitución de la multiplicadora. Estos valores incluyen tendencias previas para detectar posibles patrones de comportamiento que en un alto porcentaje terminarán en daños, con el fin de abordar el problema en sus etapas más tempranas [100].

En este caso, una información detallada como la causa del incidente, el nivel de aceite, posibles partículas en los detectores de partículas metálicas de la multiplicadora o incluso advertencias, alarmas e información del sistema de monitoreo continuo (CMS) [101] sería importante para que los laboratorios puedan estudiar en profundidad el tipo de relaciones entre los parámetros del análisis físico-químico del aceite y el resto de la información operativa [102].

En la actualidad, los análisis de aceite se gestionan como una de las herramientas utilizadas para determinar el estado de la multiplicadora o al menos para determinar medidas más específicas como endoscopias u otras acciones [48]. Sin embargo, para mejorar la fiabilidad, el alcance y la precisión en las conclusiones, también es necesario utilizar este flujo de información a la inversa, de tal manera que la información operativa ayude a que la analítica de aceite no solo forme parte de la información utilizada para tomar otras decisiones, sino que también forme parte de un proceso integral.

4. RESULTADOS

Las siete acciones relacionadas con la operación y mantenimiento de un aerogenerador descritas en la sección anterior se examinan y discuten a continuación, a la luz de los extensos resultados experimentales. Cada acción se estudia individualmente en las siguientes secciones, proporcionando ejemplos reales de 40 aerogeneradores en siete ubicaciones diferentes.

4.1. Resultados ensayo 1. Fugas y relleno de aceite

La concentración de cada uno de los parámetros incluidos en el aceite (medida como partes por millón) se utiliza normalmente en el análisis de aceite. En esta prueba, se comprobó la evolución de aditivos como el zinc, fósforo y azufre en una multiplicadora de un aerogenerador de 2,5MW, en cinco momentos diferentes, con una frecuencia de seis meses (test 1, test 2, test 3, test 4 y test 5), de 2015 a 2017. La capacidad total del aceite en la multiplicadora es de 340 litros y las recargas fueron de 40 litros entre la prueba 3 y la prueba 4 (segundo trimestre de 2016), es decir, un refresco del 12%. Otras muestras del mismo parque eólico fueron rechazadas durante el estudio debido a situaciones externas que alteraron la tendencia. En algunos casos, la sustitución del aceite o diferentes contaminaciones aparecieron durante el período del estudio. El aceite fue analizado en un laboratorio contratado a nivel mundial.

La tendencia normal con el paso del tiempo y el uso es mantener o disminuir los aditivos (zinc, fósforo y azufre) debido a la degradación del aceite y el desgaste de los aditivos. En este caso se predijo la tendencia teórica, extrapolando la pendiente de los resultados reales de muestras anteriores. Sin embargo, tras la fuga del aceite antiguo y el posterior reemplazo parcial de aceite nuevo con características intactas, los aditivos antes mencionados aumentaron después de la prueba 3. Las figuras 5, 6 y 7 comparan, en cinco pruebas diferentes, los resultados teóricos y medidos de la evolución de los aditivos. En estos casos se observa el evidente efecto del relleno del aceite nuevo en el aumento de los valores de estos tres aditivos.

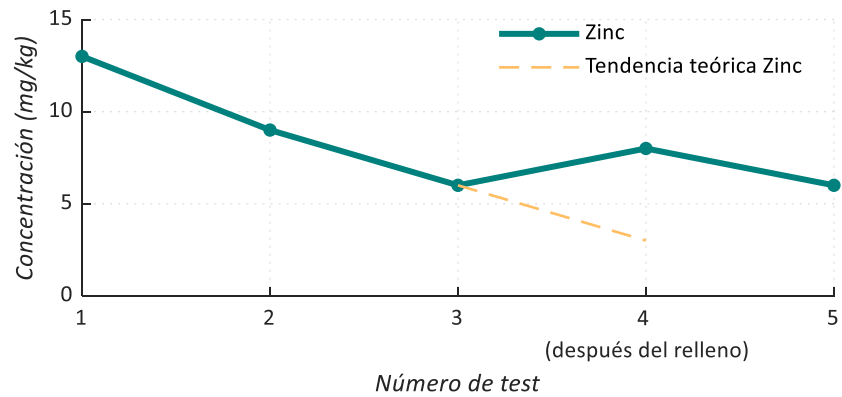


Figura 5. Resultados de los efectos del relleno en el aditivo zinc en una multiplicadora, comparando la tendencia teórica (sin relleno) y la tendencia real.

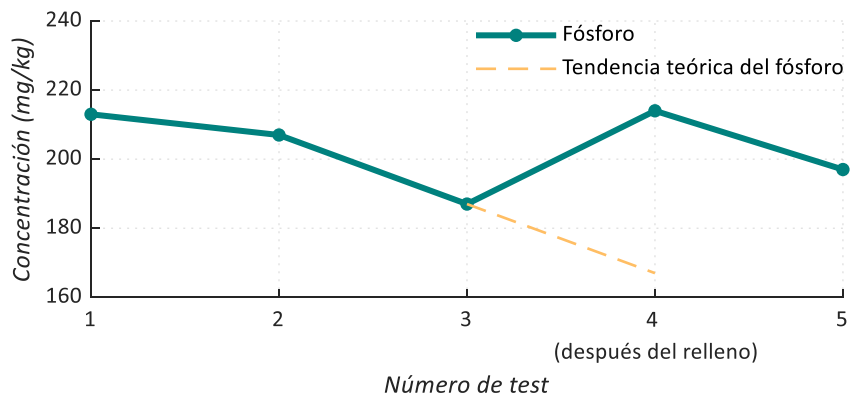


Figura 6. Resultados de los efectos del relleno sobre el aditivo Fósforo en una multiplicadora comparando la tendencia teórica (sin relleno) y la tendencia real.

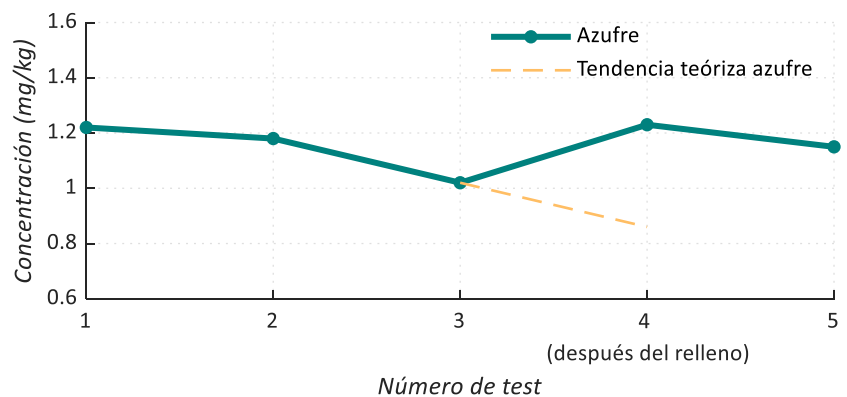


Figura 7. Resultados de los efectos del relleno sobre el aditivo Azufre en una multiplicadora comparando la tendencia teórica (sin relleno) y la tendencia real.

Los resultados experimentales de la figuras 5, 6 y 7 muestran que el relleno produce una contaminación positiva que altera la evolución de los valores teóricos en los resultados del análisis de aceite.

En este caso, es necesario comprobar si hay una fuga y repararla de forma definitiva para garantizar una analítica fiable que no oculte el estado real del aceite y la multiplicadora.

4.2. Resultados ensayo 2. Sustitución de la marca del aceite

Los resultados experimentales para este test consideran la sustitución de la marca del aceite (y sus características) en 13 aerogeneradores. La comparación incluye dos marcas de aceite que son adecuadas para el mismo equipo, en concreto, una multiplicadora de un aerogenerador de 1,5 MW en el mismo emplazamiento y con las mismas condiciones meteorológicas. La sustitución del aceite se llevó a cabo el primer trimestre de 2016 y el estudio recopiló datos de 2012 a 2016. En este caso, todas las muestras eran válidas, y ninguna situación externa alteró las tendencias. Las muestras fueron analizadas en un laboratorio contrastado a nivel mundial. Los límites de peligro para estos componentes fueron suministrados por los fabricantes de los dos aceites.

El análisis de la composición química de ambos aceites [90] reveló la presencia de aditivos como el molibdeno, el magnesio y el zinc en la composición química del primer aceite en altas cantidades, pero eran inexistentes en el segundo aceite. De hecho, los valores permitidos por cada uno son diferentes (mucho más restrictivos en el aceite 2 [aceite sin estos componentes en su composición]) que en el aceite 1, como se muestra en la Tabla 10. Estos valores son definidos por los fabricantes de cada marca y modelo de aceite.

Tabla 10. Límites de peligro de operación de los aditivos, dependiendo de la marca de aceite definida por los fabricantes, con respecto a la composición química.

Marca de aceite	Peligro (sustitución de aceite)		
	Mg (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mo (mg/kg)
Aceite 1	>3000	>3000	>2500
Aceite 2	>20	>20	>20
Aceite 2 tras <i>flushing</i>	>150	>150	>100

En el caso del aceite 2, se analizan dos situaciones con diferentes límites: el primer escenario considera aceite nuevo en una multiplicadora nueva, y el segundo escenario tiene en cuenta una multiplicadora en operación donde se sustituye el aceite antiguo de una determinada marca por otro nuevo de una marca distinta, previo lavado (*flushing*) del aceite

antiguo de la multiplicadora antes de que se introduzca el nuevo aceite [103]. En ambos casos se contempla que siempre habrá restos del aceite anterior. Si el escenario fuera el opuesto, es decir, la multiplicadora estaba usando aceite 2, que luego fue reemplazado por aceite 1 (aceite con estos componentes específicos), no habría ningún problema porque los valores de estos tres elementos siempre estarían por debajo de los límites de peligro.

Tras la sustitución de estas dos marcas de aceites en 13 multiplicadoras, los resultados de la evolución de los diferentes elementos analizados como aditivos y partículas de desgaste se muestran en las figuras 8, 9 y 10. La frecuencia de las cuatro tomas de muestra es cada seis meses y el cambio de marca del aceite se realiza antes de la prueba 3. La línea discontinua amarilla en las figuras 8, 9 y 10 representa los valores máximos permitidos para la concentración de aditivos en el caso del aceite 2 y aceite 2 con flushing. Esta línea discontinua amarilla disminuye de la prueba 3 a la prueba 4 debido a la diferencia en el valor máximo permitido para cada marca de aceite. La línea discontinua negra de las figuras 6, 7 y 8 representa un zoom de la prueba 4.

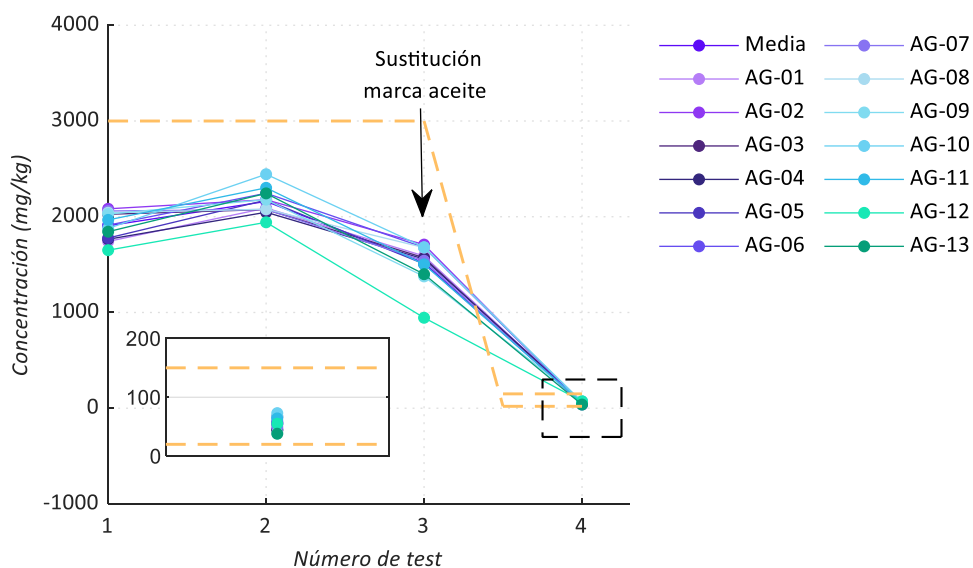


Figura 8. Evolución después de la sustitución de la marca de aceite; Evolución del mg.

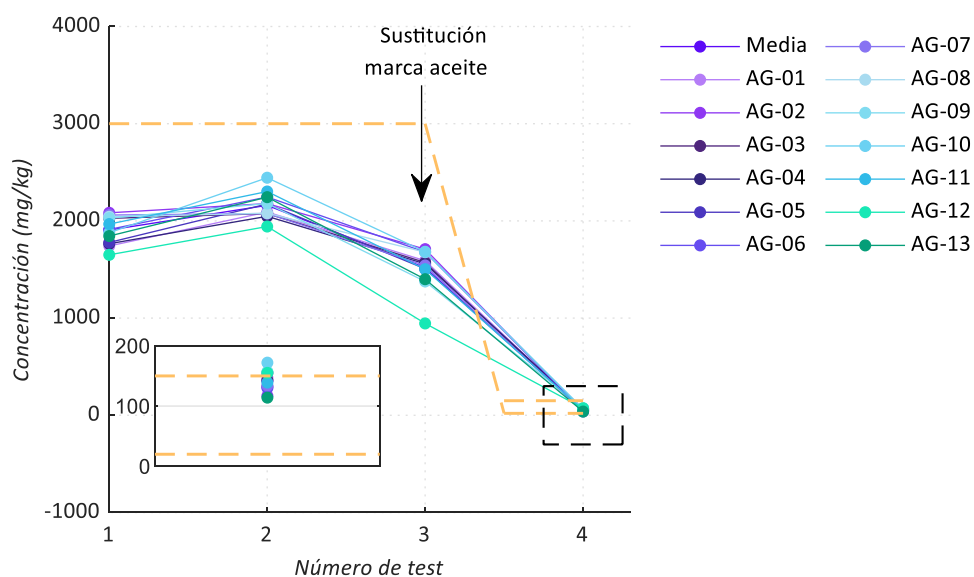


Figura 9. Evolución después de la sustitución de la marca de aceite; Evolución del Zn.

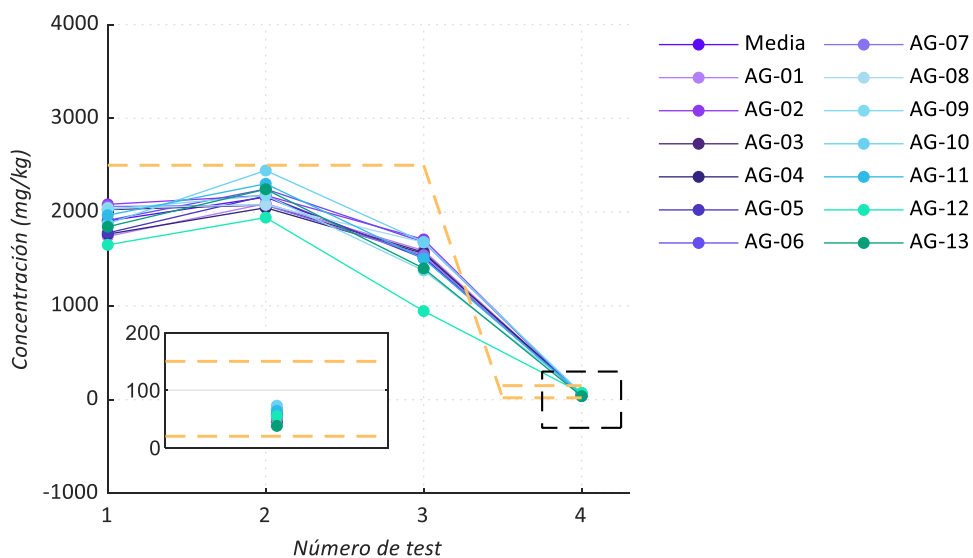


Figura 10. Evolución después de la sustitución de la marca de aceite; Mo evolución.

Calculando analíticamente esta situación, es necesario estimar los litros de aceite que quedan en la multiplicadora después de la sustitución del aceite viejo.

$$NC \text{ (mg/kg)} = \frac{[CNO \left(\frac{mg}{kg}\right) \times NQ \text{ (L)}] + [COO \left(\frac{mg}{kg}\right) \times RQ \text{ (L)}]}{TQ \text{ (L)}} \quad (4)$$

Donde:

- NC es la nueva concentración.
- CNO es la concentración del aceite nuevo (aceite 1).
- NQ es la nueva cantidad de aceite (litros) de aceite 1.
- COO es la concentración del aceite viejo (aceite 2).
- RQ es la cantidad de aceite (litros) de aceite 2.
- TQ es la cantidad total de aceite (litros) en la multiplicadora.

Estimando los 15 litros restantes en el caso del Zn y recogiendo la cantidad total de aceite nuevo (320 litros), el resultado sería:

$$NC \text{ (mg/kg)} = \frac{[0 \left(\frac{mg}{kg}\right) \times 320 \text{ (L)}] + [2000 \left(\frac{mg}{kg}\right) \times 15 \text{ (L)}]}{325 \text{ (L)}} = 92,3 \text{ mg/kg} \quad (5)$$

Como consecuencia de esta sustitución de la marca de aceite, en un caso normal, el resultado de las 13 pruebas de aceite nuevo tendría la categorización de "peligro", teniendo en cuenta que existen componentes como el molibdeno, zinc y magnesio que superan ampliamente los rangos admisibles para esta marca de aceite (<20 mg/kg). Sin embargo, en este caso, el aceite se sustituye después del *flushing* dentro de la multiplicadora; por lo tanto, los valores estarían dentro de los límites más altos establecidos por el fabricante de aceite (<150 mg / kg). En consecuencia, es obligatorio hacer una buena evaluación de los resultados para saber no solo que la marca de aceite ha sido reemplazada, sino también para saber que se ha llevado a cabo un *flushing*.

En el caso de que los valores estuvieran muy por encima de los nuevos límites, sería necesario rellenar con aceite nuevo de intactas propiedades (si el laboratorio y el mantenedor estiman como correcta esta acción y ambas partes están de acuerdo en hacerlo). Incluso la sustitución del aceite total y un nuevo lavado sería necesario (como se explica en la sección 3.2).

4.3. Resultados ensayo 3. Instalación de filtro portátil offline

En este estudio se llevó a cabo el análisis de aceite en seis aerogeneradores de 1,5 MW en el mismo parque eólico, antes y después de la instalación de un filtro offline portátil. El filtro portátil se instaló durante el segundo trimestre de 2017, con una duración media de una semana en cada uno de los aerogeneradores, excepto en el aerogenerador de la prueba 2, donde el periodo se amplió a dos semanas debido a los altos niveles de contaminación. Las muestras se tomaron justo antes del filtrado y se analizaron justo después de la finalización en el mismo

laboratorio contrastado a nivel mundial, por lo que no se consideran alteraciones en la comparación.

La figura 11 muestra la evolución de los diferentes parámetros analizados antes (barras amarillas) y después (barras verdes) de la instalación del equipo portátil de filtrado offline. Los resultados se muestran en las pruebas 1 a 6, que representan la analítica anterior y posterior en cada uno de los seis aerogeneradores.

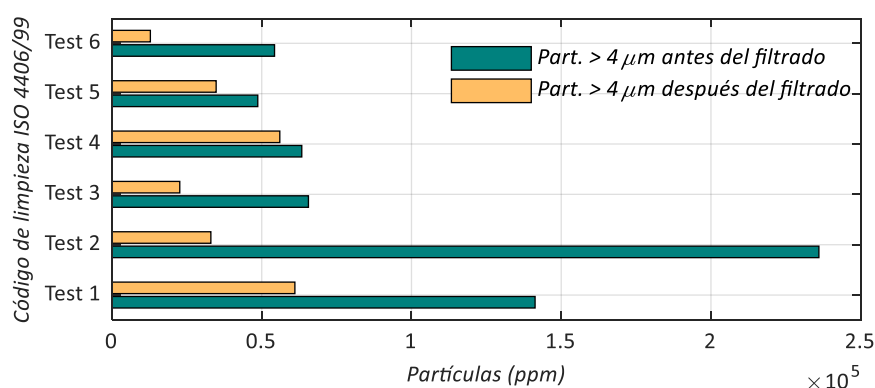


Figura 11. Comparación de partículas > 4 μm antes y después del filtrado fuera de línea.

Las figuras 12, 13 y 14 muestran que, en cinco de los seis casos, la reducción de partículas mayores de 4 μm, 6 μm y 14 μm es bastante pronunciada, con evidente mejora en la limpieza del aceite, tanto en los casos en que el aceite tenía un mayor número de partículas (aerogenerador 1 y aerogenerador 2) como cuando el aceite estaba más limpio (aerogenerador 3, aerogenerador 5 y aerogenerador 6, en menor medida). Los resultados son más evidentes en el caso del aerogenerador 2 por dos razones: i) la duración del período fue el doble y ii) las partículas de los tres tamaños son altas, por lo que el filtro retuvo un mayor porcentaje de partículas que cuando los niveles iniciales son más bajos. Solo en un caso, aerogenerador 4, la reducción es mínima, especialmente en partículas > 14 μm, donde las partículas incluso aumentan en un 9%. Este aumento no tiene sentido desde un punto de vista teórico ya que el filtro no puede añadir ninguna partícula, sino que solo puede eliminarlas, por lo que se considera una contaminación en el muestreo para justificar este resultado.

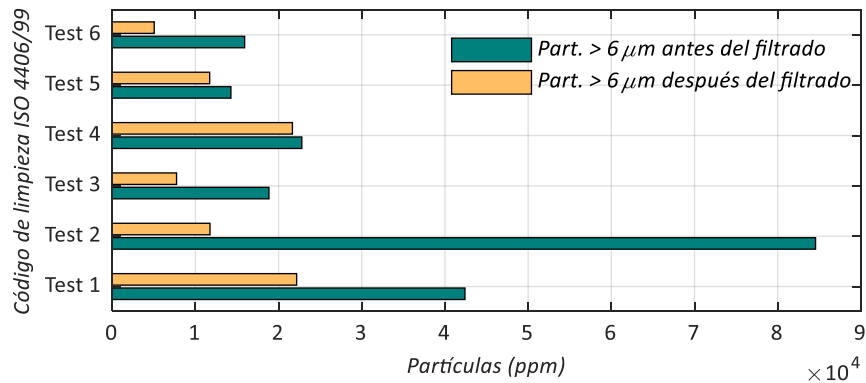


Figura 12. Comparación de partículas >6 μm antes y después del filtrado fuera de línea.

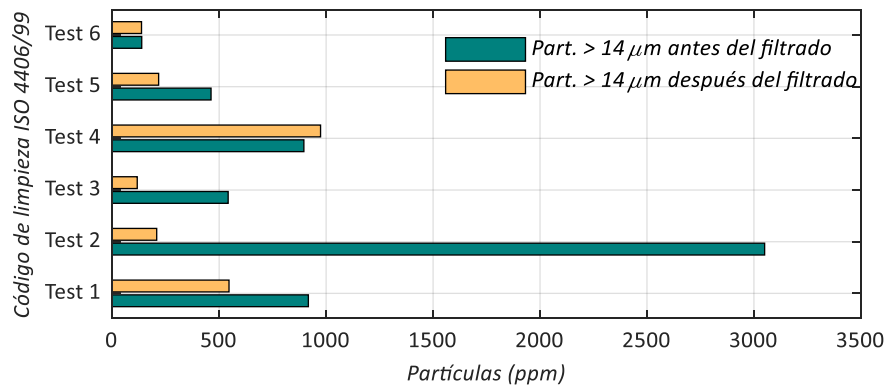


Figura 13. Comparación de partículas > 14 μm antes y después del filtrado fuera de línea.

Al analizar los valores promedio en los seis resultados del análisis de aceite (figura 14), se observó que la reducción de los tres tipos de partículas es de alrededor del 66%, confirmando así el impacto (positivo) de la práctica de filtrado off-line.

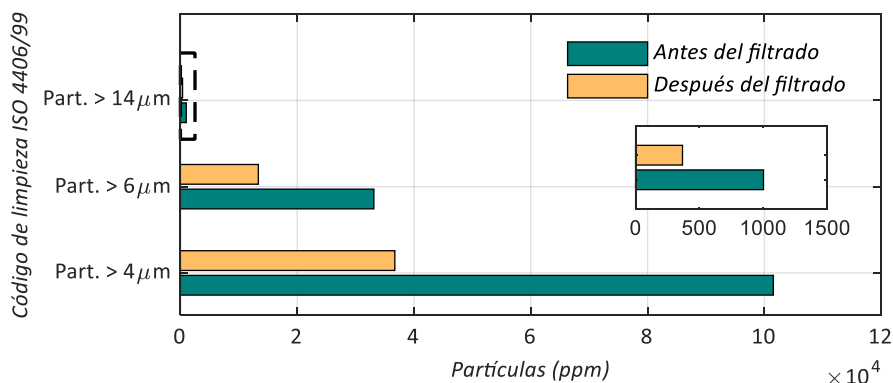


Figura 14. Efectos del filtrado sobre la contaminación por aceite (media)—número de partículas (ISO 4406/99).

La mejora del estado del aceite puede observarse en la figura 15. Como se explica en la Tabla 9, el código ISO se expresa en tres números (por ejemplo: 15/17/12) que representan un código de nivel de contaminante para el tamaño de partícula asociado (4 μm, 6 μm y 14 μm). Sin embargo, se puede ver que la mejora es más evidente en aceites con una mayor concentración de partículas.

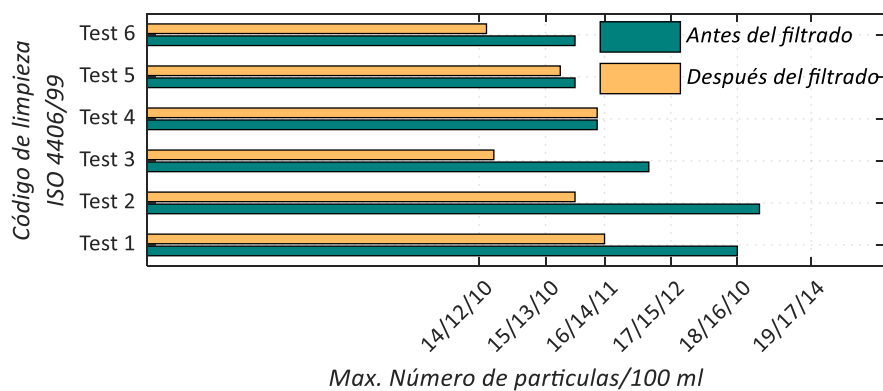


Figura 15. Evolución de partículas según el código de limpieza ISO 4406/99 antes y después del filtrado.

Si bien es cierto que los beneficios sobre el aceite son indubitables, la sustitución en la evolución de los resultados del análisis de aceite puede causar errores en la interpretación.

En situaciones de un deficiente rendimiento del filtro, es importante supervisar en las siguientes pruebas si se produce un incremento de partículas.

4.4. Resultados ensayo 4. Alta temperatura del aceite y sustitución de válvulas termostáticas

Para este estudio se han analizado los datos del periodo de noviembre de 2014 a diciembre de 2016 de veinte aerogeneradores de 2,5 MW del mismo parque eólico, tecnología, emplazamiento y condiciones meteorológicas, con el fin de comprobar el efecto de la sustitución de las válvulas de aceite. Otras muestras del mismo parque eólico fueron rechazadas durante el análisis por dos razones: i) no se reportaron problemas de temperatura y ii) situaciones externas al estudio, como contaminaciones o sustitución de aceite, alteraron la tendencia. El aceite fue analizado en un laboratorio contratado a nivel mundial.

Tras analizar estos datos, se detectaron dos aerogeneradores con un aumento de las temperaturas del aceite (aerogenerador 17 y aerogenerador 22) y posterior sustitución de las válvulas. Como se explica en la sección 4.4, en este caso, las temperaturas de estos dos aerogeneradores estaban fuera del rango de la media de los otros 18. El aumento de la temperatura se debe al incorrecto rendimiento de estas válvulas termostáticas.

Primer caso (aerogenerador 17). El defecto debido a la alta temperatura se detectó en noviembre de 2015 y las válvulas se cambiaron en diciembre de 2015.

Se puede observar cómo la temperatura del aceite del aerogenerador 17 se desvía claramente de los valores de temperatura promedio antes de la sustitución de la válvula en noviembre de 2015 (figura 16), pero vuelve a los valores de temperatura promedio aproximados cuando se sustituye la válvula en diciembre de 2015 (figura 17).

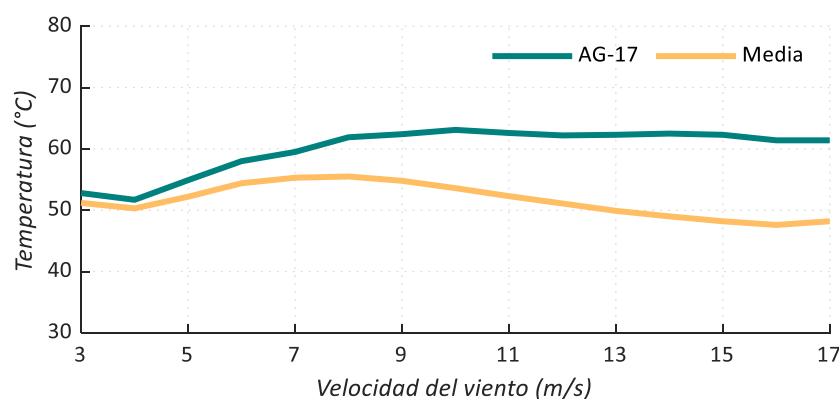


Figura 16. Temperatura de la multiplicadora de aceite en noviembre de 2015.

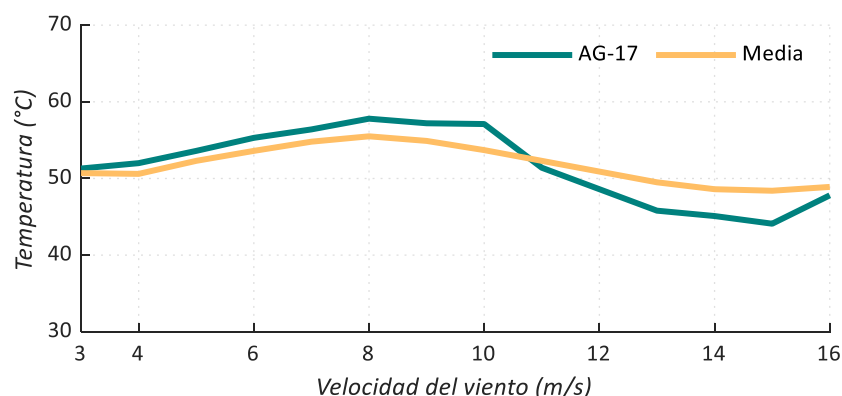


Figura 17. Temperatura de la multiplicadora de aceite en diciembre 2015.

Segundo caso (aerogenerador 22). El defecto debido a la alta temperatura se detectó en febrero de 2016 y las válvulas se cambiaron a finales de ese mismo mes.

Se observó una tendencia similar en el caso de aerogenerador 22, obteniendo una desviación de los valores de temperatura del aceite antes de la sustitución de la válvula (figura 18) y una misma tendencia cuando se instaló la nueva válvula (figura 19).

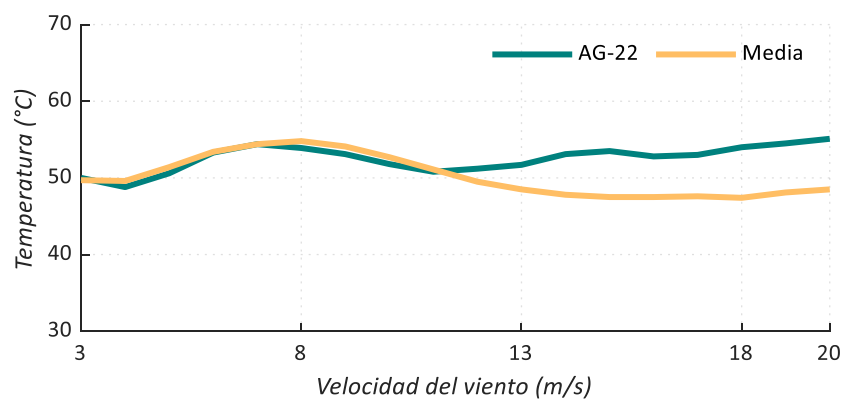


Figura 18. Temperatura de la multiplicadora de aceite en febrero 2016.

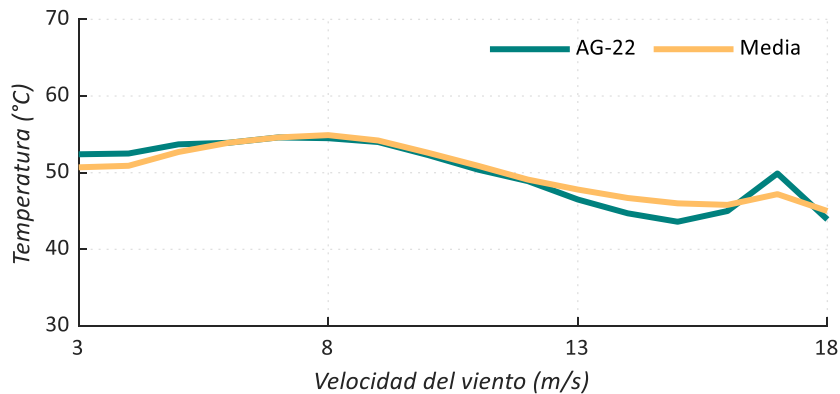


Figura 19. Temperatura de la multiplicadora de aceite en marzo 2016.

En ambos casos (aerogenerador 17 y aerogenerador 22), las consecuencias de la sustitución de válvulas en los resultados del análisis de aceite son relevantes en cuanto al aumento de elementos de desgaste como el zinc (figura 20) y el cobre (figura 21), debido a la instalación de nuevas piezas con contenido de ambos materiales.

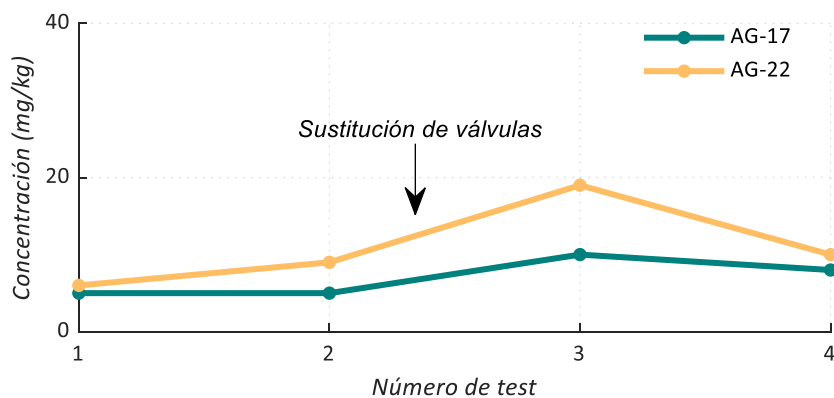


Figura 20. Sustitución de válvulas. Evolución del zinc.

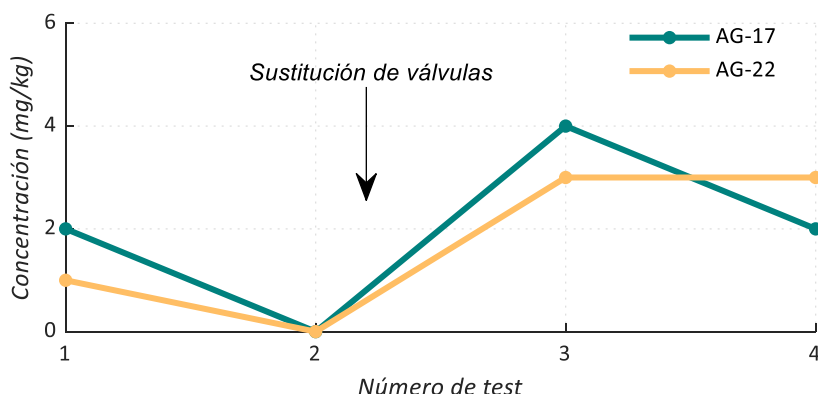


Figura 21. Sustitución de válvulas. Evolución del cobre.

Las analíticas 1 y 2 se realizan antes de la sustitución de la válvula, la muestra de la analítica 3 se toma después de instalar la nueva válvula y la analítica 4 recopila datos posteriores a un proceso de filtrado. Se puede observar que la concentración de zinc y cobre aumenta claramente cuando se instala la nueva válvula debido a la contaminación con los materiales de la válvula (analítica 3), y disminuye en cierta medida después del proceso de filtrado.

Las conclusiones de estos análisis de aceite podrían llevar a confusión (por falta de información). También se tiene en cuenta que estos elementos muestran el desgaste de los rodamientos; por lo tanto, se requerirían nuevas acciones innecesarias como endoscopias o análisis de vibraciones, con los costes asociados [48].

4.5. Resultados ensayo 5. Posición de la toma de muestra

Dos muestras del mismo aceite, para la misma multiplicadora con 320 litros en un aerogenerador de 1,5 MW, se tomaron al mismo tiempo y se analizaron en el mismo laboratorio de contrastado a nivel mundial en el segundo trimestre de 2018. La única diferencia entre ambas muestras es la posición de la muestra, antes y después del filtro (posición 1 y 2, respectivamente, en la figura 3).

La figura 22 muestra que el aumento en los tres tipos de tamaños de partícula es: i) 20% en el caso de partículas $>4 \mu\text{m}$; ii) 33% para $>6 \mu\text{m}$; y iii) 7% para $>14 \mu\text{m}$.

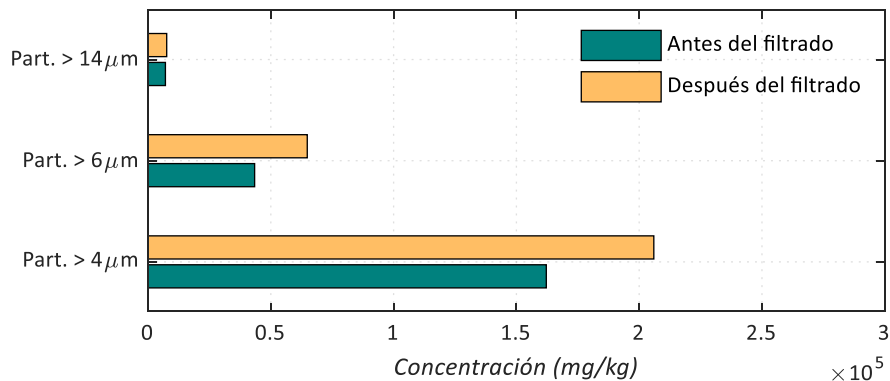


Figura 22. Resultados de las dos diferentes posiciones de tomas de muestra en las partículas (en 100 mL.; ISO 4406/99).

En este caso, la suciedad del filtro ha alterado los valores debido a que, en la posición 2, las partículas en el aceite son más altas que en la posición 1. Como consecuencia de este resultado, el filtro debe ser revisado, limpiado e incluso sustituido si es necesario. En el caso de que el filtro estuviera limpio y por lo tanto funcionara correctamente, es decir, limpiara el aceite y eliminara la suciedad, ocurrirá lo contrario, que el número de partículas en la muestra 1 sería inferior a 2. Por lo tanto, es importante siempre tomar muestras en la misma posición con el fin de evitar diferencias en los resultados y si no es así, reportarlo.

4.6. Resultados ensayo 6. Sustitución de filtros de aire

En este estudio se comprobó la evolución de la presencia de agua en el aceite en cinco multiplicadoras de aerogeneradores de 2,5 MW en siete periodos de tiempo diferentes, con una frecuencia de seis meses de 2015 a 2019 (test 1 a test 7). Desde 2015 se estaba produciendo un incremento continuado de agua en el aceite de las cinco multiplicadoras, pero este incremento se hace aún más pronunciado en los últimos meses, durante 2018 y 2019 (del test 5 al test 6). Inmediatamente después de la prueba 6, se instalaron filtros especiales para la reducción de agua en las multiplicadoras [104], por lo que estuvieron operando durante seis meses, hasta la siguiente prueba, la número 7.

Los resultados experimentales de la figura 23 muestran que, tras la prueba 6, la instalación de filtros específicos de reducción de agua en todas las multiplicadoras provocó una importante reducción de la presencia de agua. Esta caída en los valores de agua se confirmó en todos los casos y, con una reducción media del 40%, los llevó a valores registrados dos años antes. Así, se confirma que los resultados de la condición del aceite fueron alterados (mejorados) debido a una acción externa, en este caso, la implementación de un filtro especial que reduce el agua en el aceite.

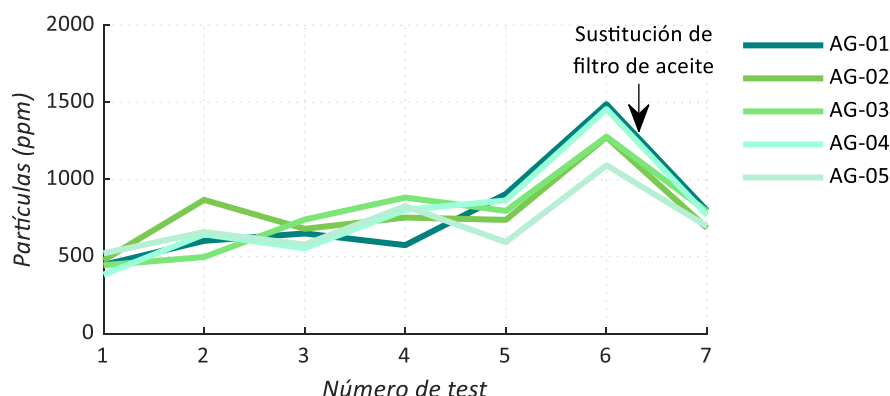


Figura 23. Evolución del agua en aceite en cinco multiplicadoras.

4.7. Resultados. Prognosis de los daños de la multiplicadora

Se han estudiado las tendencias históricas de los resultados de aceite de las multiplicadoras que han experimentado daños en rodamientos y engranajes o incluso sustituciones de estos componentes. El objetivo de este estudio es el de analizar la evolución de los diferentes parámetros de meses o años anteriores al incidente, con el fin de mostrar cómo determinados parámetros pueden ser indicadores de daños en la multiplicadora. No obstante, el objeto de esta tesis no es el de realizar una detección o identificación de los daños en base a ningún algoritmo ni a técnicas de minería de datos. En este caso, se estudiaron cuatro aerogeneradores de 2,0 MW con la misma tecnología, durante el periodo que va desde 2013 a 2019.

4.7.1. Sustitución de rodamiento

La figura 24 muestra la evolución del nivel de zinc (Zn) en las últimas nueve pruebas en un aerogenerador de once años, con una periodicidad de seis meses entre cada prueba, desde agosto de 2013 a diciembre de 2017. El incremento fue constante desde niveles bajos hasta cantidades que triplicaban la cantidad inicial, alcanzando la zona de advertencia, previa a los valores peligrosos.

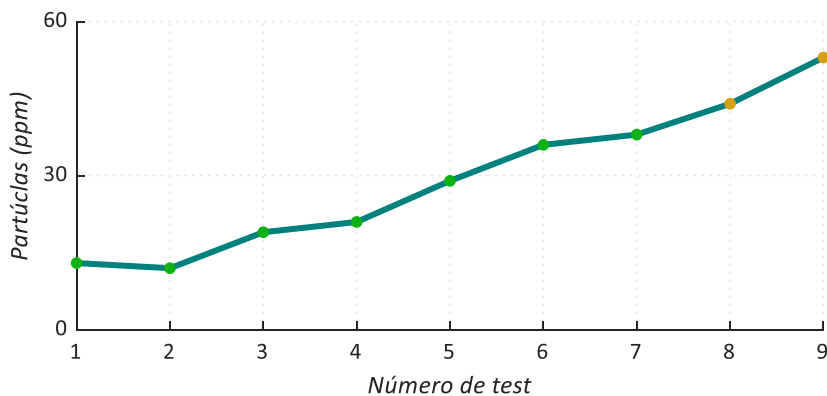


Figura 24. Evolución de Zn ppm (Partículas de zinc) en aceite en las últimas nueve pruebas.

El resto de la información recogida sobre esta multiplicadora registrada en la Tabla 11 no aporta ninguna sugerencia relevante de daños anteriores, salvo algunas partículas metálicas en el sensor metálico, es decir, un imán colocado en el interior de la multiplicadora. Esta información, junto con la evolución del zinc, podría indicar un deterioro constante en algún material con este componente, como tubos, válvulas o rodamientos, lo que en última instancia ha provocado un mayor daño. En este caso se trataba de la fractura en un rodamiento y daños menores en engranajes.

Tabla 11. Recopilación de información operativa previa al evento en el Caso 1.

Información del aerogenerador	Advertencias	Sin avisos
	Alarmas	Sin alarmas
	CMS	-
Información de la multiplicadora	Nivel de aceite	Ok
	Imán	Pocas partículas
	Partículas metálicas de filtro en línea	Pocas partículas
	Partículas metálicas de filtro fuera de línea	Ok
Daños / Consecuencias	Daños / Consecuencias	Hendiduras y marcas abrasivas en engranajes y rodamientos. Fracturas en un rodamiento Parada del aerogenerador y sustitución del rodamiento dañado y el siguiente más cercano (por prevención)

4.7.2. Sustitución de la multiplicadora

La evolución del zinc y el fósforo en la figura 25 muestra una evolución normal cada seis meses hasta la prueba 6. A partir de este punto se identifica una reducción lenta, pero progresiva, del nivel de fósforo. En el caso del zinc, un aumento importante en los valores se refleja a partir de la analítica 7. En ambos casos, los valores se encontraban dentro de los límites normales, excepto en las pruebas previas al incidente, cuando ambos parámetros alcanzaron un estado de advertencia. Los datos incluyen el período comprendido entre junio de 2013 y septiembre de 2018.

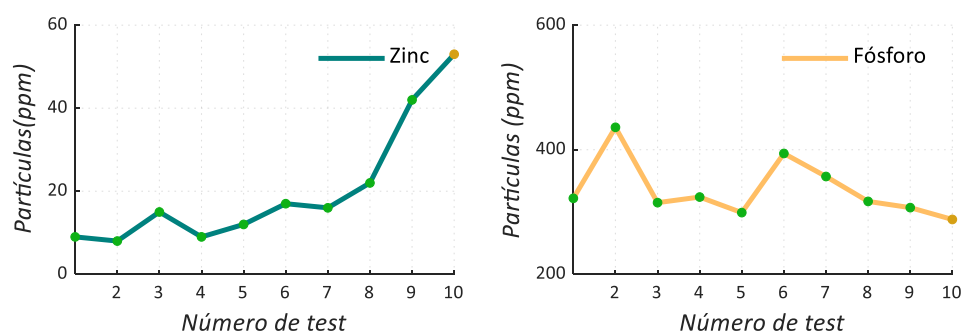


Figura 25. Evolución de las partículas de zinc y partículas de fósforo en el aceite en las últimas diez analíticas.

En cuanto a los daños, la Tabla 12 muestra que se produjo un desplazamiento de un engranaje planetario de la multiplicadora, lo que generó un desprendimiento de partículas metálicas y un aumento repentino de la temperatura. Además, el nivel del aceite estaba por debajo del nivel mínimo. La consecuencia de estos graves daños fue la sustitución de la multiplicadora.

Tabla 12. Recopilación de información operativa previa al evento en el Caso 2.

Información del aerogenerador	Advertencias	Sin alarmas
	Alarmas	Incremento de la temperatura del aceite
	CMS	-
Información de la multiplicadora	Nivel de aceite	Por debajo del mínimo
	Imán	Partículas pequeñas abundantes
	Partículas metálicas de filtro en línea	Partículas pequeñas abundantes
	Partículas metálicas de filtro fuera de línea	-
Daños / Consecuencias	Daños	Desplazamiento de un engranaje planetario de la multiplicadora
	Consecuencias	Reemplazo de la multiplicadora

4.7.3. Daños en engranajes

La figura 26 evidencia que la evolución de los niveles de hierro (Fe) ha ido aumentando constantemente cada seis meses desde la primera prueba hasta la última, es decir, desde octubre de 2013 hasta marzo de 2019, en un aerogenerador de trece años de antigüedad. A partir de la prueba 7, los valores están en un estado de advertencia y las dos últimas pruebas antes de la parada muestran cómo los valores continúan creciendo, entrando en una fase de peligro.

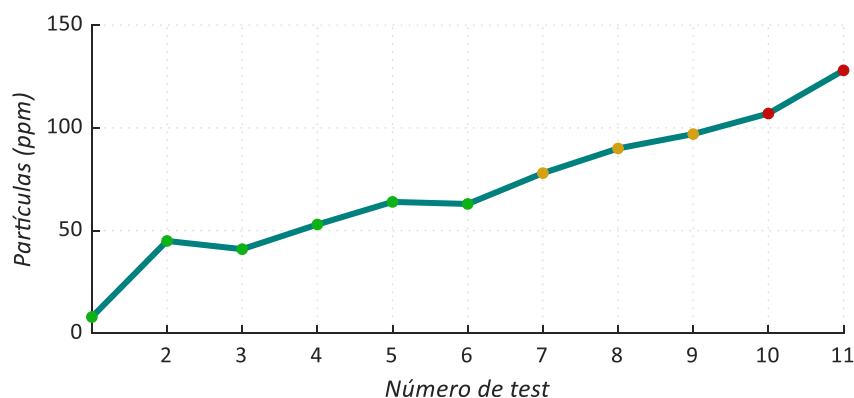


Figura 26. Evolución del Fe ppm (partículas de hierro) en el petróleo en los últimos once ensayos.

No hubo información adicional que revelara daños más allá del análisis de aceite y algunas partículas metálicas pequeñas en el imán de la multiplicadora, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Recopilación de información operativa antes del evento en el Caso 3.

Información del aerogenerador	Advertencias	Sin advertencias
	Alarmas	Sin alarmas
	CMS	-
Información de la multiplicadora	Nivel de aceite	Ok
	Imán	Pocas partículas pequeñas
	Partículas metálicas de filtro en línea	Ok
	Partículas metálicas de filtro fuera de línea	-
Daños / Consecuencias	Daños	Macropitting, muescas y marcas [29] en un cojinete del portador del planeta [30]
	Consecuencias	Comprobar la evolución cada tres meses. Posible sustitución futura

Este caso demuestra la importancia de los resultados y de las tendencias del análisis de aceite. El componente dañado no se puede reemplazar debido a la disposición en la multiplicadora, por lo que la solución parcial es hacer un seguimiento continuo, verificando el estado de los componentes de la multiplicadora mediante el uso de un videoscopio [51]. Es decir, en este caso no es posible una solución definitiva, pero la multiplicadora puede seguir funcionando bajo supervisión periódica.

4.7.4. Sustitución de la multiplicadora

La evolución del fósforo (P) en el aceite representado en la figura 27 ha sufrido una disminución relevante entre las pruebas 5 y 6, pasando de niveles normales a niveles de advertencia. El análisis incluye pruebas semestrales de diciembre de 2013 a marzo de 2017.

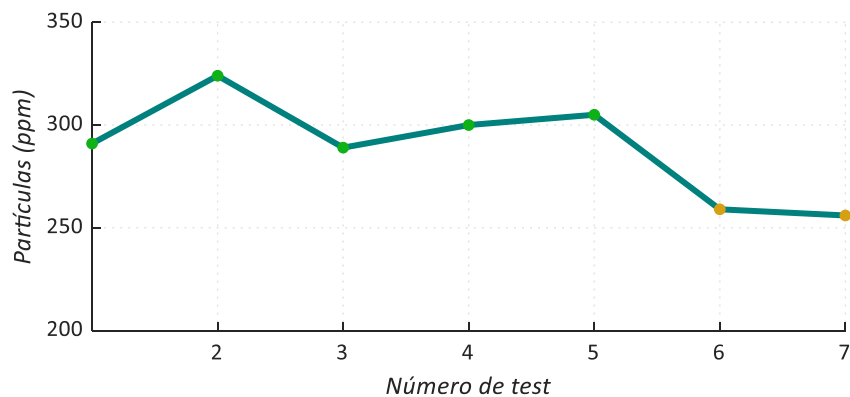


Figura 27. Evolución de P ppm (partículas de fósforo) en aceite en las últimas siete pruebas.

La información recogida en la Tabla 14 muestra un caso claro de daños catastróficos, sin ninguna advertencia relevante en los diferentes detectores del aerogenerador en general y de la multiplicadora en particular. En esta situación, la multiplicadora debe permanecer parada hasta que pueda ser reemplazada.

Tabla 14. Recopilación de información operativa antes del evento en el Caso 4.

Información del aerogenerador	Advertencias	Sin advertencias
	Alarmas	Sin alarmas
	CMS	Advertencia
Información de la multiplicadora	Nivel de aceite	Por encima del máximo
	Imán	Pocas partículas
	Partículas metálicas de filtro en línea	Pocas partículas
	Partículas metálicas de filtro fuera de línea	Pocas partículas
Daños / Consecuencias	Daños / Consecuencias	Múltiples dientes rotos Sustitución de la multiplicadora

4.8. Resumen resultados

Los extensos resultados descritos en el conjunto de este capítulo 4. *Resultados*, muestran que la información incompleta en los procedimientos de O&M puede conducir a un diagnóstico erróneo. En concreto, en este trabajo se analizaron de forma individualizada por primera vez siete situaciones relacionadas con la operación y mantenimiento de un parque eólico y su efecto en el aceite de las multiplicadoras de los aerogeneradores, llegando a los siguientes resultados:

- i) El relleno de aceite altera significativamente la concentración de aditivos (por ejemplo, zinc, fósforo y azufre) en los resultados del análisis de aceite.
- ii) La sustitución de la marca del aceite puede conducir a falsas alarmas, ya que los aditivos (por ejemplo, molibdeno magnesio y zinc) pueden exceder los límites permitidos.
- iii) La instalación de un filtro offline afecta en gran medida la concentración de partículas de desgaste y por tanto modifica los resultados del análisis de aceite.
- iv) La sustitución de la válvula termostática altera los valores de algunos aditivos (por ejemplo, zinc y cobre) debido a la contaminación con los materiales de la válvula.
- v) La posición de la toma de la muestra causa modificaciones en la concentración de partículas de desgaste.
- vi) La instalación de un filtro especial de aire especial rebaja en gran medida el porcentaje del contenido de agua en el aceite.
- vii) El estudio de los eventos previos, evolución de los parámetros incluidos en el aceite y las tendencias históricas a un evento como pueden ser daños en rodamientos y engranajes o incluso sustituciones de estos componentes, pueden aportar detección de



posibles patrones de comportamiento que en un alto porcentaje terminarán en daños, con el fin de abordar el problema en sus etapas más tempranas.

Teniendo en cuenta el impacto de los siete ensayos analizados, se puede concluir que el diagnóstico es sensible a diferentes aspectos de la operación de un aerogenerador, es decir, ignorar los aspectos relevantes podría conducir a un diagnóstico erróneo. De ahí la importancia de llevar a cabo la operación y mantenimiento de un parque eólico contando con toda la información completa necesaria.



5. PROPUESTA DE PLANTILLA DE ANALÍTICAS DE ACEITE EN MULTIPLICADORAS

Teniendo en cuenta el análisis del sector desarrollado en el capítulo 2, la ausencia de información relevante y estandarización de la documentación que acompaña a la muestra de aceite, así como las diferentes situaciones que afectan a los resultados descritas en el capítulo y la importancia de la prognosis (capítulos 3 y 4), a continuación, se propone una nueva plantilla que acompañe a cada una de las muestras de aceite tomadas en el parque eólico. Los objetivos de la publicación de esta plantilla son: (i) ser una opción que pueda ser utilizada en cualquier parque eólico de todo el mundo, (ii) minimizar el tiempo necesario para rellenar el formulario, (iii) contribuir a estandarizar la información manejada por todas las partes y (iv) proporcionar información detallada a los laboratorios para mejorar las conclusiones, recomendaciones y planes de acción.

En el diseño de esta plantilla, se ha incidido en la reducción de tiempos de ejecución y en la ausencia de información no relevante. El cumplimiento de esta plantilla debe ser ejecutado no solo por los técnicos, sino también del resto de personal implicado en el proceso, como responsables de zona u oficina técnica, ya que hay datos históricos, números de referencia e información no siempre accesible a los técnicos de campo que debe ser incluida.

El método para adjuntar la información puede ser: (i) físico (en papel), incluyendo una pegatina con el código QR [94] para pegar en las botellas con el contenido del aceite o (ii) digital, incluyendo toda la información en una aplicación (app), haciendo también uso de la pegatina del código QR.

Por último, los datos de contacto del laboratorio estarían accesibles para contar con apoyo en caso de necesidad de soporte.



PLANTILLA DE INFORMACIÓN DE TOMA DE MUESTRA EN ACEITE DE MULTIPLICADORA

1. Identificación / Trazabilidad

No. 123456

Fecha de muestra __/__/____ Primer análisis del aceite Sí No
 Número de laboratorio _____ Si no, referencia anterior _____



2. Parque Eólico

Nombre _____ Cliente _____
 Ubicación _____ País _____ Offshore Sí No

3. Aerogenerador

Marca _____ Modelo _____ Número de serie _____
 Identificación de referencia _____ Número de instrucción de trabajo _____
 Contador de operaciones _____ kWh Horas Meses

4. Multiplicadora

Marca _____ Modelo _____ Número de serie _____
 ¿Sustitución de la multiplicadora? No Sí
 Capacidad (litros) _____ Relleno (litros) _____
 Contador de operación _____ kWh Horas Meses

5. Lubricante

Marca _____ Sustitución de la marca? Sí No
 ¿Primer análisis después de la sustitución de aceite? Sí No
 Contador de operaciones _____ kWh Horas Meses

6. Operación y Mantenimiento

Filtro de aceite off-line instalado No Sí
 Portátil de __/__/____ a __/__/____
 Permanente
 Sustitución de válvulas termostáticas No Sí Fecha __/__/____
 Sustitución de filtros de aireo No Sí Filtro especial para reducir el agua
 Posición de la toma de muestra Antes del filtro estándar Después del filtro estándar
 Antes del filtro offline Después del filtro offline

7. Sustitución de multiplicadora o cualquier componente interno (rodamientos, engranajes...)

Información del aerogenerador	Advertencias
	Alarmas
	CMS
Información de la multiplicadora	Nivel de aceite
	Imán
	Partículas metálicas de filtro en línea
	Partículas metálicas de filtro fuera de línea
Daños / Consecuencias	Daños
	Consecuencias
Comentarios	

Teléfono: XXXXXXXXXXXXX

Correo electrónico: XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX



La justificación del contenido de la plantilla se detalla a continuación:

1. Identificación/Trazabilidad. En este caso, la identificación de la muestra y la garantía del orden correcto de las tendencias históricas es clave para un análisis a largo plazo, tal y como queda demostrado en los resultados incluidos sobre la importancia de la trazabilidad de los resultados en el capítulo 4. Adicionalmente, tal y como se explica en la sección 3.1, Tabla 7, el uso de teléfonos inteligentes y aplicaciones ad-hoc o productos como códigos QR [94], puede proporcionar comodidad y fiabilidad al gestionar la información.
2. Parque Eólico. Como se explica en el capítulo 3.1, Tabla 2, la mayoría de las partes ignoran esta información. Esta plantilla incluye toda la información relacionada con el parque eólico y la referencia para parques eólicos marinos, en cuyo caso las acciones y recomendaciones podrían ser diferentes, tal y como se detalla en el capítulo 2.2.3.
3. Aerogenerador. En este punto se incluyen todos los datos de registro del aerogenerador incluidos en el capítulo 3.1, Tabla 3. Adicionalmente, en este caso se incluye un contador del aerogenerador que registra la producción, horas equivalentes o tiempo de operación desde el inicio de esta. Tal y como ha quedado mostrado en el ensayo del capítulo 4.2, es básico conocer si ha habido una sustitución de la marca del aceite, con las asociadas modificaciones en la composición del mismo.
4. Multiplicadora. La sustitución de la multiplicadora se ha destacado en esta plantilla debido a la relevancia de esta situación, aunque esta información se puede detectar también con el contador de operaciones. El posible relleno de aceite y el total de la capacidad de la multiplicadora se ha incluido con el fin de considerar la proporción de aceite nuevo y los efectos en los resultados. Las consecuencias del relleno de aceite quedan evidenciadas en la sección 4.1.
5. Lubricante. La sustitución de la marca cuenta con una pregunta específica y directa para asegurar que esta situación sea considerada en el análisis. Como quedó probado en el ensayo de la sección 4.2, esta situación puede generar consecuencias relevantes en los resultados y recomendaciones. También hay una pregunta específica que se centra en el primer análisis después de la sustitución ya que, de ser así, podría justificar la diferencia en los diferentes resultados con las tendencias pasadas. Esta cuestión es diferente y complementaria a la información incluida en el apartado 1 de la plantilla, Identificación/Trazabilidad, donde la pregunta se refiere al primer registro del aceite en la multiplicadora y no hay ninguna información histórica.
6. Operación y Mantenimiento. Debido al análisis previo del capítulo 3, como a los ensayos y demostraciones ejecutadas y explicadas en el capítulo 4, este apartado incluye preguntas específicas y novedosas sobre las diferentes situaciones que se dan en la operación y



mantenimiento de un aerogenerador y que alteran las conclusiones de los resultados obtenidos en las analíticas. La respuesta correcta a estas preguntas, incluidos los períodos o las fechas, son fundamentales para lograr resultados y conclusiones fiables en estos casos.

7. Sustitución de multiplicadora o cualquier componente interno (rodamientos, engranajes, ejes...). En este caso, cuando se ejecuta una sustitución de un componente interno de la multiplicadora, es pertinente recopilar todos los registros disponibles de diferentes fuentes de información proporcionadas por el aerogenerador para poder obtener patrones de comportamiento que incluyan las operaciones habituales en la operación y mantenimiento de un parque eólico que pueden alterar las conclusiones de las analíticas de aceite. En la sección 3.8, se explica el valor de esta información detallada para los laboratorios. En la sección 4.7, se han analizado cuatro casos que muestran la evolución de diferentes parámetros durante los años anteriores al incidente y sus consecuencias.
8. Comentarios. Si alguna información relevante no está incluida en las preguntas anteriores, se puede destacar en esta sección. Se debe incluir el contacto con el laboratorio para tener acceso a resolver dudas o dudas. Tal y como ha quedado ampliamente justificado en el capítulo 4, toda la información relevante de operación debe ser incluida junto con la muestra de aceite enviada al laboratorio.



6. CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El sector de la energía eólica está en un proceso permanente de mejora, ahondando en aspectos como la fiabilidad, la veracidad, la certidumbre o la precisión. Hay operaciones incluidas dentro de la operación y mantenimiento de un parque eólico que se realizan en muchos casos con información incompleta, lo que lleva a un diagnóstico erróneo. El rápido crecimiento del sector eólico en las últimas décadas, así como la asunción de prácticas habituales que se han dado por válidas sin un análisis profundo y contrastado, han contribuido a estas conclusiones y diagnósticos no siempre certeros.

En el caso específico del aceite de la multiplicadora de los aerogeneradores, los resultados de los análisis de aceite pueden verse muy alterados por fenómenos y eventos extrínsecos. A pesar de la importancia del mantenimiento predictivo, hay una falta de análisis del impacto de algunos aspectos de la operación y el mantenimiento que afectan en el diagnóstico del aceite de la multiplicadora.

Tras analizar diferentes situaciones y eventos relativamente habituales en la operación y mantenimiento de la multiplicadora de un aerogenerador, este estudio ha demostrado que los resultados del análisis de aceite pueden sufrir variaciones en diferentes situaciones que pueden alterar los resultados y confirman las hipótesis planteadas sobre cada una de las diferentes afecciones a los resultados de los análisis. Tan importante como detectar estas situaciones es verificar cómo los datos recogidos por los diferentes operadores y transferidos a los laboratorios no incluyen esta información en la mayoría de los casos.

En concreto, los extensos resultados experimentales de parques eólicos con diferentes ubicaciones y tecnologías indican que el estado de los aceites y los resultados del análisis de aceite se ven afectados por diferentes causas:

- Las mejoras en el estado del aceite se producen en casos tales como:
 - Fugas y relleno de aceite, donde las propiedades intactas del nuevo aceite conducen a un aumento general de los aditivos de la mezcla y mejoran el estado general del aceite.
 - La instalación de un filtro de aceite portátil offline, que genera una reducción en la suciedad del aceite y las partículas de desgaste.
 - La instalación de un filtro de aire especial de reducción de agua, que reduce la concentración del agua en el aceite y las consecuencias derivadas de ello.

- Los resultados se ven alterados en varias situaciones:
 - Cuando se sustituye la marca del aceite, lo que normalmente implica una composición química diferente y proporciones de aditivos distintas (incluso aditivos diferentes). En este caso, los restos del aceite antiguo que quedan incluso después de la limpieza y flushing de la multiplicadora, quedan diluidos en el aceite nuevo, provocando por lo tanto una contaminación que altera los nuevos resultados.
 - Cuando la posición de la toma de la muestra es diferente (antes o después del filtrado), a pesar de contar con dos muestras en el mismo equipo y en el mismo día, el hecho de que se tomen en diferentes posiciones hace que los resultados presenten diferencias debido al efecto del filtro en la limpieza del aceite, como se demuestra en este estudio.
- Se produce un deterioro de los resultados cuando el aceite funciona a altas temperaturas. La causa más común de este evento es la degradación en las válvulas termostáticas, lo que genera dobles consecuencias:
 - Altas temperaturas en la operación.
 - Reposición de las propias válvulas termostáticas, que cuentan con piezas de hierro y cobre que producen un aumento de estos elementos en el aceite.

Las consecuencias de estas situaciones pueden ser, por un lado, la ejecución de nuevas tareas adicionales y costes innecesarios como: (i) rellenos de aceite, (ii) filtrados offline, (iii) ejecución de nuevas muestras de aceite, (iv) videoscopias o (v) análisis de vibraciones, incluyendo el trabajo adicional de los técnicos y la pérdida de producción. Por otro lado, sin información fiable que advierta de situaciones de riesgo, no se pueden tomar medidas que detengan la evolución del problema y que solucionen o controlen la situación de riesgo, lo que puede llevar a la necesidad de sustitución de componentes, incluso multiplicadoras completas, con la pérdida de producción y costes de grúa asociados.

Adicionalmente, el estudio del conocimiento anticipado de algunos incidentes confirma la importancia de recopilar y analizar la información de aspectos relacionados con la operación pasada de la multiplicadora y cómo se pueden anticipar daños futuros en algunos casos. Estos valores incluyen tendencias previas con el objetivo de detectar posibles patrones de comportamiento, que en un alto porcentaje terminarán en daños, con el fin de abordar el problema en sus etapas más tempranas. Con el intercambio de este tipo de información se logra mejorar el flujo de información en ambos sentidos, de tal manera que la información operativa ayude a que la analítica de aceite no solo forme parte de la información utilizada para tomar otras decisiones, sino que también forme parte de un proceso integral.

La plantilla incluida en este trabajo busca incorporar nueva información de manera rutinaria y estandarizada para generar una nueva vía de colaboración entre las partes (parque eólico y laboratorio de aceite). Es necesario transmitir que la información debe fluir en ambas direcciones para proporcionarse retroalimentación mutuamente y contar cada vez más con conclusiones más fiables y que aporten un mayor valor, lo que sería beneficioso para ambas partes. Por lo tanto, es necesario impregnar esta cultura de colaboración a lo largo de toda la cadena de valor, tanto en el lado del mantenedor, con el proceso de toma de muestras y envío de información al laboratorio, como en el lado del laboratorio, para profundizar en el conocimiento de las situaciones que pueden haber afectado los resultados, así como para proporcionar conclusiones y recomendaciones más precisas.

El mantenedor debe tener en cuenta que cumplimentar la información del aceite no es un mero procedimiento, sino algo que llevará más tiempo, pero que registrará información tremendamente valiosa. Además, es importante destacar que cualquier evolución o mejora en los sistemas y procesos relacionados con las analíticas del aceite de la multiplicadora, podrían no ser efectivos si no se dispone de unos datos de entrada en cantidad y calidad suficientes, por lo que la posible mejora no se materializaría. Al tomar una muestra de aceite, debe considerarse tan importante el bote con la cantidad de aceite a analizar, como la información adjunta a ese bote. Hay que considerar que la información que se ha generado durante seis meses (o el tiempo que se determine) tiene gran importancia con consecuencias no sólo a corto plazo, sino también a medio y largo plazo.

Esta plantilla ha sido diseñada tras un estudio en profundidad a partir de extensos resultados experimentales con el objetivo de crear una herramienta práctica que pueda ser utilizada de forma inminente en cualquier tecnología a nivel mundial. A partir de ahí, los laboratorios podrán recibir esta información y estandarizar, analizar, aplicar algoritmos e incluso inteligencia artificial para derivar patrones de comportamiento con la información de los millones de muestras anuales que analizan. Esto ayudará a los laboratorios a predecir resultados futuros en función de las acciones realizadas en la multiplicadora y a hacer frente a los valores alterados por agentes externos como consecuencia de cualquiera de estas acciones específicas, por lo que estarán en condiciones de ofrecer conclusiones y recomendaciones más específicas y precisas. También será de gran ayuda en los parques eólicos para estandarizar la información que debe ser enviada al laboratorio y para disponer de conclusiones y recomendaciones que aporten un mayor valor y certidumbre en las operaciones en el parque eólico. El impacto global podría ser enorme en términos de beneficios y, en última instancia, sería un avance en la evolución de la operación y el mantenimiento de los parques eólicos que se convertirían en un elemento permanente.

Se espera que la nueva visión y conclusiones que se han extraído de este estudio proporcionen un alto valor de archivo para los investigadores y profesionales, sentando las bases para



desarrollar más investigaciones sobre el campo y acciones más precisas del sector. Como objetivo para futuras investigaciones es necesario comprender mejor estos patrones de comportamiento teniendo en cuenta toda la nueva información disponible que los laboratorios habrán obtenido utilizando la plantilla desarrollada en la presente investigación y para ello se propone:

1. Crear bases de datos con toda la información recogida en la plantilla propuesta.
2. Extensión de los ensayos de prognosis en multiplicadoras que hayan sufrido eventos relevantes.
3. Con toda la información recolectada, diseñar algoritmos que generen nuevas conclusiones y recomendaciones más precisas de forma automática.



ANEXO I. SAMPLE TEMPLATE PROPOSAL


(Debido al carácter global de la plantilla propuesta, a continuación se incluye la plantilla en inglés, así como la información adicional para su comprensión).

Considering the state of art developed in Chapter 2, the absence of relevant information and standardization of the documentation accompanying the oil sample described in Chapter 3, and the different situations that affect the results (Chapter 4, and Chapter 5) and the importance of the prognosis (Chapter 4, Chapter 5), a new global template is proposed below. The objectives of this template are: i) to be an option that can be used on any wind farm around the world, ii) to minimize the times taken to fill in the form, iii) to contribute to standardizing the information handled by all parties and iv) to provide detailed information to the laboratories to improve the conclusions, recommendations and action plans.

This template has been designed with the objective of minimization the completion times, avoiding the request of irrelevant information. The fulfilment of this template should be executed not only by the technicians, but also by managers or technical officers, since there are historical data and reference numbers to be located.

The method for attaching the information can be: i) physical (on paper), including a sticker with the QR code [94] to stick on the bottles or ii) digital, including all the information in an application (app), also making use of the QR code sticker.

Finally, the contact details of the laboratory would be accessible to have support in case of need for support.

SAMPLE TEMPLATE – GEARBOX OIL		
1. Identification / Traceability		No. 123456
Sample date ___/___/___	First oil analysis	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
Laboratory Number _____	If No, previous reference _____	
2. Wind Farm		
Name _____	Client _____	
Location _____	Country _____	Offshore <input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
3. Wind turbine		
Brand _____	Model _____	Serial number _____
Reference identification _____	Work instruction number _____	
Operation counter _____	<input type="radio"/> kWh <input type="radio"/> Hours <input type="radio"/> Months	
4. Gearbox		
Brand _____	Model _____	Serial number _____
Substitution of the gearbox?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No	
Capacity (litres) _____	Top up (litres) _____	
Operation counter _____	<input type="radio"/> kWh <input type="radio"/> Hours <input type="radio"/> Months	
5. Lubricant		
Brand _____	Substitution of brand?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
First analysis after oil substitution?	<input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No	
Operation counter _____	<input type="radio"/> kWh <input type="radio"/> Hours <input type="radio"/> Months	
6. Operation and Maintenance		
Off-Line oil filter installed	<input type="radio"/> No <input type="radio"/> Yes	
	<input type="radio"/> Portable From ___/___/___ To ___/___/___	
	<input type="radio"/> Permanent	
Replacement of thermostatic valves	<input type="radio"/> No <input type="radio"/> Yes	Date ___/___/___
Air filter substitution	<input type="radio"/> No <input type="radio"/> Yes <input type="radio"/> Special filter to reduce water	
Position of sample taking	<input type="radio"/> Before inline filter <input type="radio"/> After inline filter	
	<input type="radio"/> Before offline filter <input type="radio"/> After offline filter	
7. Substitution of gearbox or any internal component (bearings, gears, shafts...)		
Wind turbine	Warnings	
detectors	Alarms	
information	CMS	
	Oil level	
Gearbox detectors	Magnet	
information	In-line filter metal particles	
	Off-line filter metal particles	
Damages /	Damages	
Consequences	Consequences	
Comments		
Phone: XXXXXXXXXXXXXXXXX		E-mail: XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

The justification for the content of the template is explained below section by section:

1. Identification / Traceability. In this case the identification of the sample and the assurance of the correct order of historical trends is key for a long-term analysis. As explained in Section 3.1, Table 7, the use of smart phones and ad-hoc applications or products like QR codes [94], can provide comfort and reliability when managing information.
2. Wind Farm. As explained in Section 3.1, Table 2, most of the parties ignore this information. This template includes all the information related with the wind farm and the reference for offshore wind farms, in which case the actions and recommendations could be different, as detailed in chapter 2.2.3.
3. Wind Turbine. In this item, all the data registered in any case in as detailed in section 3.1, Table 3, are included. Nevertheless, in this case it is included an operation counter with three different options: kWh, hours and months.
4. Gearbox. The substitution of the gearbox has been highlighted in this template due to the relevance of this situation, even though this information could be detected with the operation counter. The possible top up has been included in this Chapter with the capacity of the gearbox in order to consider the proportion of new oil and the effects on the results. The consequences of the top up are summarized in Section 4.1.
5. Lubricant. The change of brand has a specific and direct question to ensure that this situation is considered in the analysis. As it was demonstrated in [14] and compiled in Section 4.2, it may generate relevant consequences on the results and action plans. There is also a specific question that focuses on the first analysis after substitution, that justify the different results with the past trends. This question is different and complementary to the information included in Chapter 1, where the question is referred to the first register of the oil in the gearbox and there is not any historical information.
6. Operation and Maintenance. Because of the analysis and tests executed and explained in Chapter 3 and Chapter 4, this Chapter includes specific and novel questions regarding different situations that occur in the operation and maintenance of a wind turbine. The



correct answer to these questions, including periods or dates, are critical to achieve reliable results and conclusions in these cases.

7. Substitution of gearbox or any internal component (bearings, gears, shafts...). In this case, when a substitution of an internal component of the gearbox is executed, it is relevant to collect all the available registers from different sources of information provided by the wind turbine. In Section 3.8, it is explained the value of this detailed information for the laboratories. In Section 4.7, have been analysed in four cases the evolution of different parameters during the previous years to the incident and its consequences.
8. Comments. If any relevant information is not included in the previous questions, it can be highlight in this section. The contact with the laboratory should be included to have access to solve questions or doubts.



Bibliografía

- [1] OHLENFORST, K., et al, «Global wind report,» Global Wind Energy Council, Brussels, 2019.
- [2] REPORT, RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS, «A comprehensive annual overview of the state of renewable energy,» REN 21. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, 2019.
- [3] Eólica, Asociación Empresarial, «Anuario Eólico 2021,» Madrid, 2022.
- [4] Deloitte, «Estudio Macroeconómico del Impacto del Sector Eólico en España,» Madrid, 2021.
- [5] «The wind power,» 8 09 2020. [En línea]. Available: https://www.thewindpower.net/turbines_manufacturers_2_en.php. [Último acceso: 23 06 2021].
- [6] Thomas Ackermann, Lennart Söder, «Wind energy technology and current status: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, nº 4, pp. 315-374, 2000.
- [7] «Enercon (E-82),» [En línea]. Available: <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-82/>. [Último acceso: 21 06 2021].
- [8] Ragheb, Adam & Ragheb, M., «Wind Turbine Gearbox Technologies,» de *Proceedings of the 1st International Nuclear and Renewable Energy Conference*, Ammán, 2010.
- [9] Jesús Terradillos, Jose Ignacio Ciria, «IK4-Tekniker,» 2013. [En línea]. Available: https://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/An%C3%A1lisis_aceite_aerogeneradores_ES.pdf. [Último acceso: 09 12 2020].
- [10] «Bureau Veritas,» [En línea]. Available: <https://www.bureauveritas.es/analisis-de-aceites-lubricantes>. [Último acceso: 26 11 2020].
- [11] YILDIRIM, Murat; GEBRAEEL, Nagi Z.; SUN, Xu Andy, «Integrated predictive analytics and optimization for opportunistic maintenance and operations in wind farms,» *IEE Transactions on power systems*, vol. 32, nº 6, pp. 4319-4328, 2017.
- [12] CHURCHFIELD, Matthew J., et al., «A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics,» *Journal of turbulence*, nº 13, p. N14, 2012.
- [13] Pierre Tchakoua, René Wamkeue, Mohand Ouhrouche, Tommy Andy Tameghe, Gabriel Ekemb, «Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges,» *Energies*, vol. 7, pp. 2595-2630, 2014.



-
- [14] Network, Contract Laboratory, «Contract Laboratory Network,» [En línea]. Available: <https://www.contractlaboratory.com/directory/laboratories/by-industry.cfm?Oil-Petroleum-Testing-Laboratories&i=45>. [Último acceso: 15 01 2021].
- [15] Jacobson, Mark, Delucchi, Mark, Bauer, Zack, Goodman, Savannah, Chapman, William, Cameron, Mary, Bozonnat, Cedric, Chobadi, Liat, Clonts, Hailey, Enevoldsen, Peter, Erwin, Jenny, Fobi, Simone, Goldstrom, Owen, Hennessy, Eleanor, Liu, Jingyi, «100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy roadmaps for 139 Countries of the World,» *Joule*, vol. 1, 2017.
- [16] Enevoldsen, Peter & Xydis, George, «Examining the trends of 35 years growth of key wind turbine components,» *Energy for Sustainable Development*, vol. 50, nº 10.1016, pp. 18-26, 2019.
- [17] Nations, United, «Paris Agreement,» New York (U.S.A), 2016.
- [18] Hossain, Dr. Jami, «Wind Energy 2050 - On the shape of near 100% RE grid,» World Wind Energy Association, Bonn (Germany), 2015.
- [19] Lloyd, Germanischer, Guideline for the Certification of Wind Turbines, Germany: Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, 2010.
- [20] Offshore, Federal Association of Wind Farm Operators, «BWO Federal Association of Wind Farm Operators Offshore,» [En línea]. Available: <https://bwo-offshorewind.de/en/category/offshore-windenergie/grundlagen/aufbau-und-funktion-eines-owp/>. [Último acceso: 08 06 2021].
- [21] Yi-Lei Song, Lin-Lin Tian & Ning Zhao, «Numerical simulation and model prediction of complex wind-turbine wakes,» *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 44, nº 7, pp. 627-636, 2021.
- [22] Barthelmie, R. J., S. C. Pryor, S. T. Frandsen, K. S. Hansen, J. G. Schepers, K. Rados, W. Schlez, A. Neubert, L. E. Jensen, and S. Neckelmann, «Quantifying the Impact of Wind Turbine Wakes on Power Output at Offshore Wind Farms,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 27, nº 8, pp. 1302-1317, 2010.
- [23] Churchfield, M.J.; Lee, S.; Michalakes, J.; Moriarty, P.J., «A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics,» *Journal of Turbulence*, vol. 13, nº 14, 2012.
- [24] Troldborg, N., Larsen, G.C., Madsen, H.A., Hansen, K.S., Sørensen, J.N. and Mikkelsen, R., «Numerical simulations of wake interactions between two wind turbines at various inflow conditions,» *Wind Energy, Published online in Wiley Online Librar*, vol. 2012, nº 15, pp. 525-546, 2011.



-
- [25] NES Fircroft, «NES Fircroft,» 07 09 2021. [En línea]. Available: <https://www.nesfircroft.com/blog/2021/09/offshore-and-onshore-wind-farms>. [Último acceso: 15 12 2021].
- [26] Sánchez, S.; López-Gutiérrez, J.-S.; Negro, V.; Esteban, M.D., «Foundations in Offshore Wind Farms: Evolution, Characteristics and Range of Use. Analysis of Main Dimensional Parameters in Monopile Foundations,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, nº 12, p. 441, 2019.
- [27] Letcher, Trevor M., *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, London, U.K.: ELSIEVER Academic Press, 2017.
- [28] NACHIMUTHU, Sathishkumar; ZUO, Ming J.; DING, Yi., «A decision-making model for corrective maintenance of offshore wind turbines considering uncertainties,» *Energies*, vol. 12, nº 8, p. 1408, 2019.
- [29] CARROLL, James; MCDONALD, Alasdair; MCMILLAN, David, «Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines,» *Wind Energy*, vol. 19, nº 6, pp. 1109-1119, 2016.
- [30] Lynn, Paul A., *Onshore and Offshore Wind Energy: An Introduction*, London, UK: WILEY, 2012.
- [31] ORGANISATION, GLOBAL WIND, «GWO Training Standards,» [En línea]. Available: <https://www.globalwindsafety.org/trainingstandards/trainingstandards>. [Último acceso: 28 01 2022].
- [32] Carroll, J.; McDonald, A.; McMillan, D., «Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines,» *Wind Energy*, nº 19, pp. 1107-1119, 2016.
- [33] Roggenburg, Michael & Esquivel-Puentes, Helber A. & Vacca, Andrea & Bocanegra Evans, Humberto & Garcia-Bravo, Jose M. & Warsinger, David M. & Ivantysynova, Monika & Castillo, Luciano, «Techno-economic analysis of a hydraulic transmission for floating offshore wind turbines,» *Renewable Energy, Elsevier*, vol. 153, pp. 1194-1204, 2020.
- [34] Nachimuthu, S.; Zuo, M.J.; Ding, Y., «A decision-making model for corrective maintenance of offshore wind turbines considering uncertainties,» *Energies*, nº 12, p. 1408, 2019.
- [35] Association, Danish Wind Industry, «Coste de operación y de mantenimiento en aerogeneradores,» *Wind Power*, [En línea]. Available: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/econ/oandm.htm>. [Último acceso: 12 11 2020].
- [36] Pablo Amadoz, Mariano Abadía, «Grúa Auto-trepante para Instalación y Mantenimiento de Turbinas Eólicas,» AEE - Premio de Innovación Eolo 2021, XIª Edición, Madrid, 2021.



-
- [37] E. Martínez, J.I. Latorre-Biel, E. Jiménez, F. Sanz, J. Blanco, «Life cycle assessment of a wind farm repowering process,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 260-271, 2018.
- [38] Pakenham, B.; Ermakova, A.; Mehmanparast, A., «A Review of Life Extension Strategies for Offshore Wind Farms Using Techno-Economic Assessments,» *Energies*, vol. 14, nº 7, p. 1936, 2021.
- [39] Enforcement, U.S. Department of the Interior - Bureau of Safety and Environmental, «Offshore Wind Energy Inspection Procedure Assessment,» ABSG Consulting Inc., Houston, Texas, 2015.
- [40] Eiman Tamah Al-Shammari, Shahaboddin Shamshirband, Dalibor Petković, Erfan Zalnezhad, Por Lip Yee, Ros Suraya Taher, Žarko Čojbašić, «Comparative study of clustering methods for wake effect analysis in wind farm,» *Energy*, vol. 95, pp. 573-579, 2016.
- [41] SHAFIEE, Mahmood; SØRENSEN, John Dalsgaard, «Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies,» *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 192, nº 105993, 2019.
- [42] DNV (Det Norske Veritas), «Service Specification. Type and component certification of wind turbines,» Norway, 2016.
- [43] Energética, «Energética. Guía de empresas online,» [En línea]. Available: <https://guia.energetica21.com/categorias/eolica/fabricante-y-distribucion-de-equipos>. [Último acceso: 09 01 2022].
- [44] Shafiee, M.; Sørensen, J.D., «Maintenance optimization and inspection planning of wind energy assets: Models, methods and strategies,» *Reliab. Eng. Syst. Safety*, vol. 192, nº 105993, pp. 0951-8320, 2019.
- [45] Salvador Perez-Canto, Juan Carlos Rubio-Romero, «A model for the preventive maintenance scheduling of power plants including wind farms,» *Reliability Engineering & System Safety*, ELSEVIER, vol. 119, pp. 67-75, 2013.
- [46] Seyr H, Muskulus M., «Use of Markov Decision Processes in the Evaluation of Corrective Maintenance Scheduling Policies for Offshore Wind Farms,» *Energies*, vol. 2019, nº 15, p. 12, 2019.
- [47] Yildirim, M.; Gebraeel, N.Z.; Sun, X.A., «Integrated predictive analytics and optimization for opportunistic maintenance and operations in wind farms,» *IEEE Trans. Power Syst.*, nº 32, pp. 4319-4328, 2017.



-
- [48] Marco Civera, Cecilia Surace, «Non-Destructive Techniques for the Condition and Structural Health Monitoring of Wind Turbines: A Literature Review of the Last 20 Years,» *Sensors; MDPI*, vol. 22, p. 1627, 2022.
- [49] Acreditación, Entidad Nacional de, «ENAC,» [En línea]. Available: https://www.enac.es/web/enac/que-hacemos/servicios-de-acreditacion/organismos-de-control-y-notificados?p_p_id=MensajeCookie_WAR_Gestionportlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&_MensajeCookie_WAR_Gestionportlet_javax.portlet.action=acceptarTod. [Último acceso: 15 05 2021].
- [50] Pozo, F.; Vidal, Y.; Salgado, Ó., «Wind Turbine Condition Monitoring Strategy through Multiway PCA and Multivariate Inference,» *Energies*, vol. 11, nº 749, 2018.
- [51] M. Telišková, M. Pollák, J. Török, J. Kaščák, P. Baron and V. Mezencevova, «Implementation of innovative 10 igitalization methods in reverse engineering,» de *5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, Singapore, 2018.
- [52] Avanti, «Avanti Personal Protective Equipment (PPE),» [En línea]. Available: <https://es.avanti-online.com/productos/pfpe>. [Último acceso: 28 05 2021].
- [53] Hossain, Dr. Jami, «World Wind Resource Assessment Report,» World Wind Energy Association, Bonn, Germany, 2014.
- [54] Astolfi D, Castellani F, Terzi L., «Wind Turbine Power Curve Upgrades,» *Energies*, vol. 1300, nº 5, p. 11, 2018.
- [55] (Ciemat), Centro de Desarrollo de Energías Renovables, «Informe de ensayo de curva de potencia,» ENAC Ensayos, Lubia, Soria, 2017.
- [56] Sequeira, C., Pacheco, A., Galego, P., & Gorbeña, E., «Analysis of the efficiency of wind turbine gearboxes using the temperature variable,» *Renewable Energy*, vol. 135, pp. 465-472, 2019.
- [57] Feng, Ju, and Wen Z. Shen., «Modelling Wind for Wind Farm Layout Optimization Using Joint Distribution of Wind Speed and Wind Direction,» *Energies*, vol. 8, nº 4, pp. 3075-3092, 2015.
- [58] T. Ghennam, K. Aliouane, F. Akel, B. Francois, E.M. Berkouk, «Advanced control system of DFIG based wind generators for reactive power production and integration in a wind farm dispatching,» *Energy Conversion and Management, ELSEVIER*, vol. 105, pp. 240-250, 2015.
- [59] Eduardo Hernández, Julio Cajamarca, Cristian Redrobán, Vanessa Valverde, Jaime Guilcapi, «Estudio de las pérdidas de energía en conductores eléctricos mediante



- termografía infrarroja,» de *I Congreso internacional de ingeniería*, Riobamba, Ecuador, 2017.
- [60] Magnus Currie, Mohamed Saafi, Christos Tachtatzis, Francis Quail, «Structural integrity monitoring of onshore wind turbine concrete foundations,» *Renewable Energy, ELSEVIER*, vol. 83, pp. 1131-1138, 2015.
- [61] The Wind Power, «Wind Energy Market Intelligent - Owner database,» [En línea]. Available: https://www.thewindpower.net/store_actor_en.php?id_type=6. [Último acceso: 08 08 2021].
- [62] Technology, World Wind, «View Buyer's Guide alphabetically,» [En línea]. Available: <https://www.windpower-international.com/contractors/indexAtoZ.html>. [Último acceso: 28 01 2022].
- [63] Froger, A., Gendreau, M., Mendoza, J.E. et al., «Solving a wind turbine maintenance scheduling problem,» *Journal of Scheduling*, vol. 21, pp. 53-76, 2018.
- [64] Thies Beinke, Annabell Schamann, Michael Freitag, Klaas Feldmann, Matthias Brandt, «Text-Mining and Gamification for the Qualification of Service Technicians in the Maintenance Industry of Offshore Wind Energy,» *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, vol. 6, pp. 44-52, 2017.
- [65] Association, Road and Transportation Research, «Technical testing regulations for soil and rock in road construction TP BF-StB Part B 8.3 Dynamic Plate Load Testing with the Light Drop-Weight Tester,» Working Group Earthworks and Foundations, Köln, Germany, Edition 2012, TRAslation 2018.
- [66] Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana, «Resolución de 16 de noviembre de 2021, de la Dirección de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, por la que se aprueban los medios aceptables de cumplimiento relativos a la formación y certificación de los pilotos que operen aeronaves pilotadas por contro,» Boletín Oficial del Estado, Madrid, 2021.
- [67] Elena Gonzalez, Emmanouil M. Nanos, Helene Seyr, Laura Valldecabres, Nurseda Y. Yürüşen, Ursula Smolka, Michael Muskulus, Julio J. Melero, «Key Performance Indicators for Wind Farm Operation and Maintenance,» *Energy Procedia, ELSEVIER*, vol. 137, pp. 559-570, 2017.
- [68] Lozano, Luís Romero, Gestión del mantenimiento de instalaciones de energía eólica, Madrid: Paraninfo, 2016.
- [69] Yogesh Kumar, Jordan Ringenberg, Soma Shekara Depuru, Vijay K. Devabhaktuni, Jin Woo Lee, Efstratios Nikolaidis, Brett Andersen, Abdollah Afjeh, «Wind energy: Trends and

- enabling technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ELSEVIER, vol. 53, pp. 209-224, 2016.
- [70] S. Astariz, G. Iglesias, «Accessibility for operation and maintenance tasks in co-located wind and wave energy farms with non-uniformly distributed arrays,» *Energy Conversion and Management*, ELSEVIER, vol. 106, pp. 1219-1229, 2015.
- [71] Co., Timken Bearing, «How Dirt and Water Affect Bearing Life. Machine Design,» North Canton, OH, USA, 1986.
- [72] Y. Sinha, J.A. Steel, «A progressive study into offshore wind farm maintenance optimisation using risk based failure analysis,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ELSEVIER, vol. 42, pp. 735-742, 2015.
- [73] Muthukumaraswamy, Z. S. A. Shattle and S. A., «On the comparison of various wind-turbine load control systems for maximum power tracking using PLC - SCADA,» *2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems, IEEE Xplore*, pp. 968-971, 2017.
- [74] Jamieson, Peter, *Innovation in Wind Turbine Design*, Strathclyde University, UK: WILEY, 2018.
- [75] E. Taherian-Fard, R. Sahebi, T. Niknam, A. Izadian and M. Shasadeghi, «Wind Turbine Drivetrain Technologies,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, nº 2, pp. 1729-1741, 2020.
- [76] JUNIOR, V. Jantara, et al, «Evaluation of damage mechanics of industrial wind turbine gearboxes,» *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 59, nº 8, pp. 410-414, 2017.
- [77] DEMPSEY, Paula J.; LEWICKI, David G.; DECKER, Harry J., «Investigation of gear and bearing fatigue damage using debris particle distributions,» NASA, Cleveland, Ohio, 2004.
- [78] Jesús Terradillos, José Ignacio Ciria, «Pasado, presente y futuro de la lubricación,» *Lubrication Management*. IK4- Tekniker, Madrid.
- [79] Dhanola, Anil; al, et, «Tribological challenges and advancements in wind turbine bearings: A review,» *Engineering Failure Analysis*, ELSEVIER, vol. 118, p. 104885, 2020.
- [80] Wang, Wilson, «Analysis of Fault Detection in Rolling Element Bearings,» *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 24, nº 3, pp. 42-49, 2021.
- [81] Valter Luiz Jantara Junior, Hector Basoalto, Mayorkinos Papaelias, «A damage mechanics approach for lifetime estimation of wind turbine gearbox materials,» *International Journal of Fatigue*, ELSEVIER, vol. 137, nº 105671, 2020.



- [82] Olejarczyk, K., Wikło, M., Kołodziejczyk, K., Król, K., & Nowak, R., «Experimental impact studies of the application mineral oil and synthetic oil on the efficiency of the single-gear cycloidal,» *Tribologia*, nº 1, pp. 67-73, 2017.
- [83] LTD., Focus Laboratories, «RULER. Oil Analysis for Predictive Maintenance,» Bangkok, 2017.
- [84] SHENG, Shuangwen; MCDADE, Mark; ERRICHELLO, Robert, «Wind turbine gearbox failure modes: a brief,» de *Joint Tribology Conference*, Los Angeles, California, 2011.
- [85] LIEBHERR, «1000 EC-B 125 Litronic,» [En línea]. Available: <https://www.liebherr.com/es/esp/productos/m%C3%A1quinas-de-construcci%C3%B3n/gr%C3%BAas-torre/operaciones-de-la-gr%C3%BAa/montaje-de-un-aerogenerador/informe-de-operaciones-1000-ec-b-125-litronic.html>. [Último acceso: 02 02 2022].
- [86] Carlos M.C.G. Fernandes, Pedro M.T. Marques, Ramiro C. Martins, Jorge H.O. Seabra, «Gearbox power loss. Part II: Friction losses in gears,» *Tribology International*, ELSEVIER, vol. 88, pp. 309-316, 2015.
- [87] SINHA, Yashwant, et al, «Significance of Effective Lubrication in Mitigating System Failures—A Wind Turbine Gearbox Case Study,» *Wind Engineering*, vol. 38, nº 4, pp. 441-449, 2014.
- [88] ISO, «ISO/IEC 17025:2017. Chapter 6.3 Facilities and environmental conditions,» 2017.
- [89] ISO, «ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories,» 2017.
- [90] Jesús Terradillos, Manuel Bilbao, José Ignacio Ciria, Adolfo Málaga, «Análisis del aceite como herramienta de mejora del comportamiento de las multiplicadoras de aerogeneradores. Principales problemas detectados a través del lubricante (Parte II),» Lubrication management. IK4-Tekniker, Madrid, 2014.
- [91] CEPSA, «Lubricantes enfocados a aerogeneradores,» Madrid, 2018.
- [92] Coronado D, Wenske J., «Monitoring the Oil of Wind-Turbine Gearboxes: Main Degradation Indicators and Detection Methods,» *Machines MDPI*, vol. 6, nº 2, p. 25, 2018.
- [93] Sanchez, P., Mendizabal, D., Gonzalez, K., Zamarreño C.R., Hernaez M., Matias I.R., Arregui F.J., «Wind turbines lubricant gearbox degradation detection by means of a lossy mode resonance based optical fiber refractometer,» *Microsyst Technol*, vol. 22, pp. 1619-1625, 2016.



- [94] Narayanan, A.Sankara, «QR Codes and Security Solutions,» *International Journal of Computer Science and Telecommunications (IJCSST)*, vol. 3, nº 7, pp. 69-72, 2012.
- [95] Suliman Shanbr, Faris Elasha, Mohamed Elforjani, Joao Teixeira, «Detection of natural crack in wind turbine gearbox,» *Renewable Energy, ELSEVIER*, vol. 118, pp. 172-179, 2018.
- [96] Co., Timken Bearing, «How Dirt and Water Affect Bearing Life. Machine Design,» North Canton, Ohio, USA, 1986.
- [97] International, HYDAC, «Betamicon®/Aquamicron®-Filter Elements,» Sulzbach, Germany, 2019.
- [98] Leite GD, N.P.; Araújo, A.M.; Rosas PA, C., «Prognostic techniques applied to maintenance of wind turbines: A concise and specific review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, vol. 81, pp. 1917-1925, 2018.
- [99] Jantara Junior, Valter & Zhou, Jun & Roshanmanesh, Sanaz & Hayati, Farzad & Hajiabady, Siavash & Li, Xiaoying & Dong, H & Papaelias, Mayorkinos, «Evaluation of damage mechanics of industrial wind turbine gearboxes,» *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 59, nº 10.1784/insi.2017.59.8.410., pp. 410-414, 2017.
- [100] Zhang, X.; Kang, J.; Zhao, J.S.; Cao, D.C., «Features for fault diagnosis and prognosis of gearbox,» *Italian Association of Chemical Engineering*, vol. 33, pp. 1027-1032, 2013.
- [101] Rauscher, M.S.; Tremmel, A.J.; Schardt, M.; Koch, A.W., «Non-Dispersive Infrared Sensor for Online Condition Monitoring of Gearbox Oil,» *Sensors, MDPI*, vol. 17, nº 2, p. 399, 2017.
- [102] Teng, W.; Zhang, X.; Liu, Y.; Kusiak, A.; Ma, Z., «Prognosis of the remaining useful life of bearings in a wind turbine gearbox,» *Energies*, nº 32, p. 10, 2017.
- [103] Sheng, Shuangwen, Don Roberts, «Recommended Practice: Filter Debris Collection and Analysis for Gearbox Condition Monitoring,» de *Drivetrain Reliability Collaborative Meeting. National Renewable Energy Laboratory*, Golden, Colorado, USA, 2018.
- [104] International, HYDAC, «www.hydac.com,» [En línea]. Available: <https://www.hydac.com/fileadmin/pdb/pdf/PRO0000000000000000000007218020011.pdf>. [Último acceso: 24 08 2021].
- [105] ISO, «ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories,» 2017.
- [106] Mathias Kraus, Stefan Feuerriegel, «Forecasting remaining useful life: Interpretable deep learning approach via variational Bayesian inference,» *Decision Support Systems*, vol. 125, nº 113100, 2019.



- [107] The Wind Power, «The Wind Power,» [En línea]. Available:
https://www.thewindpower.net/turbines_manufacturers_es.php. [Último acceso: 12 05 2020].
- [108] The Wind Power, «The Wind POver - Aerogeneradores,» [En línea]. Available:
https://www.thewindpower.net/turbines_manufacturers_2_es.php. [Último acceso: 23 06 2020].

