



Universidad de Valladolid

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,
Agronómica y de la Bioenergía**

Campus de Soria

MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RELACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE
MULTIPLICADORAS CON LA FÓRMULA DE LA DISPONIBILIDAD
DE TURBINAS DE GRAN POTENCIA**

~~~~~

**AUTOR: ALEJANDRO BOTIJA RUIZ**

**DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL**

**DIRECTOR/ES: LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO Y JAVIER GRACIA BERNAL**

**SORIA, MAYO DE 2018**



***AUTORIZACIÓN del DIRECTOR  
del TRABAJO FIN DE MÁSTER***

D. LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO

Profesor del departamento: INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL

Como Director del TFM titulado: “ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RELACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE MULTIPLICADORAS CON LA FÓRMULA DE DISPONIBILIDAD DE TURBINAS DE GRAN POTENCIA”

Presentado por el alumno D. ALEJANDRO BOTIJA RUIZ

Da el Vº. Bº. y autoriza la presentación del mismo, considerando que cumple las condiciones exigibles para su presentación y defensa ante un tribunal.

Soria, 9 de MAYO de 2018

El Tutor del TFM,

Fdo.: LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO



***DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DEL  
TRABAJO FIN DE MÁSTER***

Considerando que la presentación de un trabajo hecho por otra persona o la copia de textos, fotos y gráficas sin citar su procedencia se considera plagio, el abajo firmante D. ALEJANDRO BOTIJA RUIZ con DNI 72896885-H, que presenta el Trabajo Fin de Máster con el título “ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RELACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE MULTIPLICADORAS CON LA FÓRMULA DE DISPONIBILIDAD DE TURBINAS DE GRAN POTENCIA”,

Declara la autoría y asume la originalidad de este trabajo, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Soria, 9 de Mayo de 2018.

Fdo: Alejandro Botija Ruiz



# ***RESUMEN del TRABAJO FIN DE MÁSTER***

TÍTULO: “ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RELACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE MULTIPLICADORAS CON LA FÓRMULA DE LA DISPONIBILIDAD DE TURBINAS DE GRAN POTENCIA”.

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL

DIRECTOR(ES): LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO y JAVIER GRACIA BERNAL

AUTOR: ALEJANDRO BOTIJA RUIZ

## RESUMEN:

Hoy en día en los rendimientos y facturación de los parques eólicos tiene una gran importancia la no disponibilidad de cualquiera de los elementos que conforman la turbina eólica, ya que el objetivo prioritario es el alargamiento de la vida útil de los parques obteniendo una disponibilidad lo más alta posible con un funcionamiento óptimo de sus elementos, permitiendo de esta manera generar energía eólica por un mayor periodo de tiempo en su vida útil.

A lo largo del desarrollo del trabajo se realiza un estudio de los errores relacionados con las multiplicadoras, las horas de mantenimiento y prevención de fallos que afecten a la máquina entera, dejando de producir energía en esos periodos de tiempo debido a las paradas relacionadas con las multiplicadoras. Gracias a este estudio de los errores se identifica la frecuencia y la duración de los mismos, aplicando la fórmula de disponibilidad para obtener el porcentaje de error y como afecta en la multiplicadora y en el conjunto de la turbina. Gracias a ello se puede ver que errores son los que más afectan a la parada del aerogenerador, intentando hacer hincapié sobre ellos con tareas preventivas de mantenimiento para reducir su aparición y con ello evitar los tiempos de parada y falta de generación de la turbina.

En ocasiones, la no disponibilidad de stock de elementos de la turbina para realizar el cambio del elemento dañado en los casos de averías, supone unas pérdidas económicas de gran cuantía al no poder seguir generando energía. En este trabajo también se analizan las pérdidas que han supuesto los errores de multiplicadoras en el año 2016 y el estudio de si merece la pena o no tener en stock multiplicadoras disponibles para realizar el cambio inmediato y evitar las pérdidas por parada de turbina por un largo periodo de tiempo.





## ÍNDICE GENERAL

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| RESUMEN del TRABAJO FIN DE MÁSTER .....                                         | I   |
| ÍNDICE GENERAL .....                                                            | III |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                                           | V   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                                          | VII |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS .....                                                        | IX  |
| ABREVIATURAS.....                                                               | XI  |
| 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.....                                          | 1   |
| 2. OBJETIVOS Y PROPÓSITO DEL ESTUDIO.....                                       | 9   |
| 3. DISPONIBILIDAD EN PARQUES EÓLICOS .....                                      | 11  |
| 4. ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA TRATADA Y DESCRIPCIÓN DE LOS PARQUES EÓLICOS ..... | 13  |
| 4.1. DATOS GENERALES MULTIPLICADORAS .....                                      | 14  |
| 4.2. DATOS ESPECÍFICOS DE LAS TURBINAS INSTALADAS EN CADA PARQUE EÓLICO ....    | 15  |
| 4.2.1. PARQUE EÓLICO DE ONCALA .....                                            | 15  |
| 4.2.2. PARQUE EÓLICO DE MAGAÑA .....                                            | 15  |
| 4.2.3. PARQUES EÓLICOS DE CASTILFRÍO Y EL CAYO .....                            | 16  |
| 5. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE DATOS .....                                        | 21  |
| 6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DATOS Y GRÁFICOS DE LOS ERRORES.....              | 27  |
| 6.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DATOS .....                                     | 27  |
| 6.2. GRÁFICOS DE LOS ERRORES .....                                              | 29  |
| 7. DISPONIBILIDAD DE STOCK Y REPUESTOS EN ALMACÉN .....                         | 33  |
| 8. CONCLUSIONES.....                                                            | 37  |
| 9. BIBLIOGRAFÍA .....                                                           | 39  |
| ANEXO I: ERRORES Y ALARMAS .....                                                | 41  |
| ANEXO II: GRANDES CORRECTIVOS: CAMBIO DE MULTIPLICADORA .....                   | 47  |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tabla 1: Recuento total de filas de errores del archivo Excel "ERRORES 2016" por cada parque.</i>                 | 21 |
| <i>Tabla 2: Máquinas colindantes de las 33 máquinas de los cuatro parques.</i>                                       | 24 |
| <i>Tabla 3: Recuento total de resultados de los parques con tecnología de paso variable en 2016.</i>                 | 27 |
| <i>Tabla 4: Recuento total de resultados de los parques con tecnología de paso fijo en 2016. ....</i>                | 27 |
| <i>Tabla 5: Recuento de las horas de parada, disponibilidad y pérdidas económicas de los cuatro parques en 2016.</i> | 28 |
| <i>Tabla 6: Precio de energía y producciones de los años 2010-2016.</i>                                              | 34 |
| <i>Tabla 7: Multiplicadoras cambiadas entre los años 2010 al 2016.</i>                                               | 35 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 1: Global cumulative installed wind capacity 2001-2017</i> .....                                                                     | 1  |
| <i>Figura 2: Global annual installed wind capacity 2001-2017.</i> .....                                                                        | 1  |
| <i>Figura 3: Cobertura de la demanda eléctrica peninsular en el año 2017.</i> .....                                                            | 2  |
| <i>Figura 4: Esquema de los elementos que forman una turbina eólica</i> .....                                                                  | 2  |
| <i>Figura 5: Interior de una multiplicadora donde se aprecian engranajes, rodamientos y los sistemas de ejes planetarios y paralelos</i> ..... | 5  |
| <i>Figura 6: Mapa de la localización de las máquinas de los 4 parques.</i> .....                                                               | 13 |
| <i>Figura 7: Esquema de una multiplicadora de 1 etapa planetaria y 2 etapas paralelas.</i> .....                                               | 14 |
| <i>Figura 8: Curva de potencia de la turbina Neg Micon NM48/750.</i> .....                                                                     | 15 |
| <i>Figura 9: Curva de potencia de la turbina Neg Micon NM52/900.</i> .....                                                                     | 16 |
| <i>Figura 10: Curva de potencia de la turbina Made AE-52.</i> .....                                                                            | 16 |
| <i>Figura 11: Comparativa de las curvas de potencia en las turbinas NM48, NM52 y AE-52.</i> .....                                              | 17 |
| <i>Figura 12: Multiplicadora de los parques de Castilfrío y El Cayo.</i> .....                                                                 | 18 |
| <i>Figura 13: Multiplicadora del parque Oncala.</i> .....                                                                                      | 18 |
| <i>Figura 14: Multiplicadora del parque Magaña.</i> .....                                                                                      | 18 |
| <i>Figura 15: Ejemplo de la base de datos, coloreados los diferentes errores a tener en cuenta.</i> ..                                         | 22 |
| <i>Figura 16: Ejemplo del cálculo de las pérdidas en diferentes errores.</i> .....                                                             | 25 |



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| <i>Gráfico 1: Errores Castilfrío 2016.</i> ..... | 29 |
| <i>Gráfico 2: Errores El Cayo 2016.</i> .....    | 30 |
| <i>Gráfico 3: Errores Oncala 2016.</i> .....     | 30 |
| <i>Gráfico 4: Errores Magaña 2016.</i> .....     | 31 |





## ABREVIATURAS

|        |                                                                                                   |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CETASA | Compañía Eólica de Tierras Altas S.A.                                                             |
| GMR    | Regresor de mapeo generalizado                                                                    |
| GRNN   | General Regression Neuronal Network / Red neuronal de regresión general                           |
| GWEC   | Global Wind Energy Council                                                                        |
| MLP    | Perceptrón multicapa de alimentación anticipada                                                   |
| OPAX   | Ruta operacional con entradas exógenas                                                            |
| O&M    | Operation and maintenance / Operación y mantenimiento                                             |
| TPA    | Transfer Path Analysis / Ruta de transferencia experimental                                       |
| SCADA  | Supervisory Control And Data Acquisition / Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos |
|        |                                                                                                   |
| Hind   | Horas de indisponibilidad                                                                         |
| Hpar   | Horas de parada                                                                                   |
| Htot   | Horas totales                                                                                     |



## 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

A lo largo de los últimos años ha habido un crecimiento de la demanda de energía en todo el mundo, junto a la concienciación y propósitos de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de energías provenientes de recursos renovables, para la sostenibilidad del medio ambiente. Por ello ha aumentado la investigación y desarrollo de las energías renovables en todo el mundo, creando energía de manera renovable y sostenible con el planeta, reduciendo a su vez el consumo de recursos no renovables. Dentro del amplio rango de producción de energía con recursos renovables y sostenibles, la energía eólica ha destacado y evolucionado gracias a que es una forma de generación de energía muy atractiva y rentable entre las demás energías debido a su limpieza, eficiencia y el rápido crecimiento que ha tenido esta tecnología en todo el mundo.

Como se puede apreciar en la *Figura 1* la energía eólica instalada en el mundo creció un 12,4 % en 2016 y un 10,7 % en 2017, hasta situarse en 539.581 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC). China, Estados Unidos, Alemania, India y España son los primeros productores mundiales (Fried, 2018). Sin embargo, en la *Figura 2* se ve como en el 2015 se instalaron 63.633 MW y como en 2016 y 2017 han bajado esas cifras de energía eólica instalada en el mundo. A pesar de que las cifras hayan sido más bajas en comparación con el 2015, muchos parques eólicos están pendientes de aprobación, por lo que se va avanzando en el camino correcto de expandir y generar energía renovable a través de la eólica en todo el mundo.

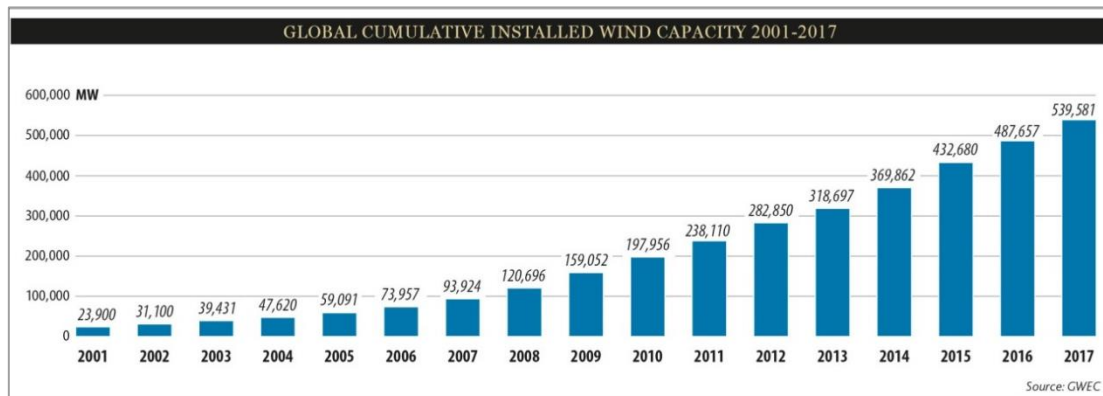


Figura 1: Global cumulative installed wind capacity 2001-2017. Fuente GWEC.

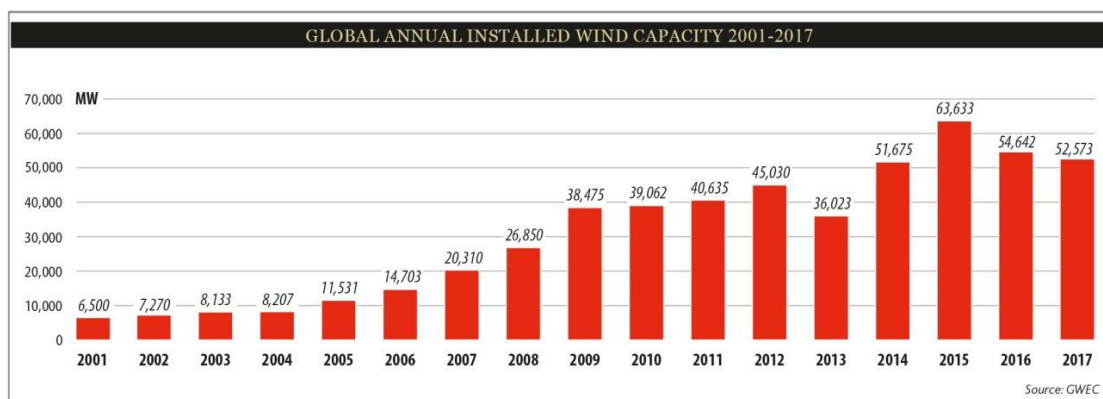


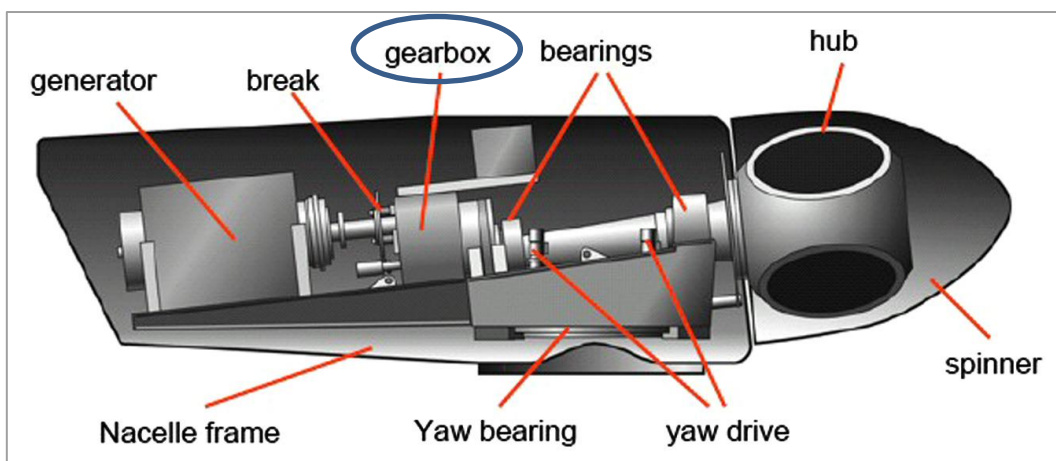
Figura 2: Global annual installed wind capacity 2001-2017. Fuente GWEC.

En España la potencia acumulada de eólica hace un total de 23.121 MW, siendo la segunda fuente de generación eléctrica a lo largo del año 2017, con una producción de 47.886 GWh y una cobertura de la demanda eléctrica del 18,2 % (La eólica en España, 2018) (Red Electrica de España, 2018), como se observa en la *Figura 3* del conjunto de la cobertura de la demanda eléctrica peninsular. Desde el punto de vista de la generación, la energía eólica supuso el 47,3 % de toda la producción renovable, seguida de la hidráulica con el 35,5 % y la solar, con el 12,9 % (Red Electrica de España, 2018).



*Figura 3: Cobertura de la demanda eléctrica peninsular en el año 2017. Fuente REE.*

Para la generación de esta energía eólica, las turbinas eólicas aprovechan la energía del viento con las palas para transformarla en energía eléctrica. Las turbinas de gran potencia están formadas por 3 palas que gracias a la energía del viento giran a muy baja velocidad, entre 20 y 25 r.p.m., por lo que es necesario que esta velocidad de giro se aumente lo suficiente para poder generar energía convencional utilizando un generador eléctrico. Para ello se utilizan las multiplicadoras, cuya función es la de multiplicar esta velocidad de viento de 20-25 r.p.m. del buje hasta llegar a unas 1.500 r.p.m., revoluciones establecidas para lograr los 50 Hz de frecuencia a los que funciona el transporte de energía de la red eléctrica. Estas revoluciones se consiguen a partir de ejes de engranajes, que posteriormente gracias al generador, acoplado con un eje de gran velocidad a la multiplicadora, sea capaz de producir energía (Marques, Fernandes, Martins, & Seabra, 2014). En la *Figura 4* se muestra la localización de la multiplicadora en las turbinas eólicas, los acoplamientos con el rotor y con el generador gracias al eje lento y al eje rápido.



*Figura 4: Esquema de los elementos que forman una turbina eólica (Zhao & Ji, 2015).*

Estas multiplicadoras tienen una eficiencia de trabajo con un tanto por ciento muy alto, pero cualquier pequeño aumento de la eficiencia tiene un impacto significativo, debido al gran número de vueltas y rozamiento que sufren sus elementos y a la gran potencia con la que trabajan, por lo que un mantenimiento adecuado y el uso de un aceite con características óptimas de trabajo pueden hacer que la vida útil de dichas máquinas aumente y su rendimiento sea mucho más eficiente que con el uso de otros lubricantes de peor calidad y de un mantenimiento menos intensivo, abaratando de esta manera los costes finales (Fernandes, Blazquez, Sanesteban, Martins, & Seabra, 2016), (Hur & Leithead, 2016) y (Sarker & Ibn Faiz, 2016).

Para que el tiempo de producción y creación de energía renovable proveniente del viento sea el máximo posible en un parque eólico, es importante tener un buen mantenimiento de todos sus elementos. Esto implica tareas de mantenimiento eficientes para la disminución de los tiempos de parada debidos a fallos del sistema y así poder mejorar los rendimientos de los parques eólicos (Florea, Paraschiv, & Cimpoeșu, 2012). Según lo expuesto por (Florea, Paraschiv, & Cimpoeșu, 2012) una de las claves importantes a tener en cuenta en los mantenimientos de las turbinas, es la de tener un sistema de mantenimiento predictivo para la optimización del funcionamiento de los parques eólicos, para lo que centra especial interés y estudio de las vibraciones y del ruido en tiempo real del aerogenerador. Gracias a este sistema se permite detectar los problemas que se desarrollan en las turbinas de forma temprana y así poder predecir, prevenir y reparar gracias al mantenimiento preventivo los posibles errores y fallos del aerogenerador que afecten al rendimiento de la generación óptima de la máquina. También se estudia la programación óptima de tareas de mantenimiento y recursos asociados para mejorar el rendimiento del parque. Con un sistema de monitoreo del ruido y vibraciones en tiempo real se puede hacer un análisis efectivo del desempeño de un sistema de detección de fallos.

Relacionado con este mantenimiento preventivo basado en el análisis y monitoreo de ruidos en tiempo real, (Abdollahzadeh, Atashgar, & Abbasi, 2016) proponen y estudian un modelo de oportunidad multiobjetivo para optimizar el mantenimiento de un parque con distintos tipos de aerogeneradores. Con este mantenimiento se intenta maximizar la tasa de energía esperada y minimizar los costes totales relacionados con los esfuerzos del mantenimiento. El estudio comparativo que realiza, muestra que el mantenimiento oportunista mejora el rendimiento del mantenimiento, mejora proporcionalmente su coste y la tasa de producción de energía aumenta gracias al buen funcionamiento de los aerogeneradores.

En CETASA se cuenta con dos equipos de mantenimiento (Vestas y Gamesa) encargados cada uno de ellos de hacer el mantenimiento a sus parques. Una vez que cada equipo realiza la tarea de mantenimiento preventivo y reajustes (2 veces al año) hace inspección visual por si encuentran cualquier fallo, de esta manera con la inspección visual de la turbina crean un mantenimiento de oportunidad para el resto de componentes y así comprobar que toda la maquinaria funcione perfectamente. En caso que se vea alguna anomalía o los operarios encuentren algún desperfecto o ruido en el sistema, se crea una alarma de mantenimiento que posteriormente se llevará a cabo y con ello evitar problemas mayores y que el rendimiento del parque sea el óptimo.

En relación a estos tipos de mantenimientos preventivos que se han expuesto, (Sarker & Ibn Faiz, 2016) crean también un modelo de mantenimiento con una estrategia preventiva de múltiples niveles, enfocándola principalmente a los parques offshore, pero con utilidad también en los parques on-shore. En este modelo propuesto se consideran dos tipos de acciones preventivas, el mantenimiento preventivo y el reemplazo preventivo. El equipo de mantenimiento reemplaza el componente fallido y al mismo tiempo aprovecha la oportunidad para reemplazar o mantener de forma preventiva los componentes en ejecución. Otro tema importante que trata y que se ha observado en CETASA que es importante a la hora del mantenimiento y de cualquier operación a realizar en las turbinas, es que todas estas labores están condicionadas por la combinación de vientos, ya sean de alta, media y baja velocidad, debido a que con fuertes vientos no se pueden realizar maniobras en las turbinas de mantenimiento y prevención, ni otro tipo de maniobras, como los grandes correctivos, que deben tener un máximo de 8 a 10 m/s para que los operarios puedan trabajar.

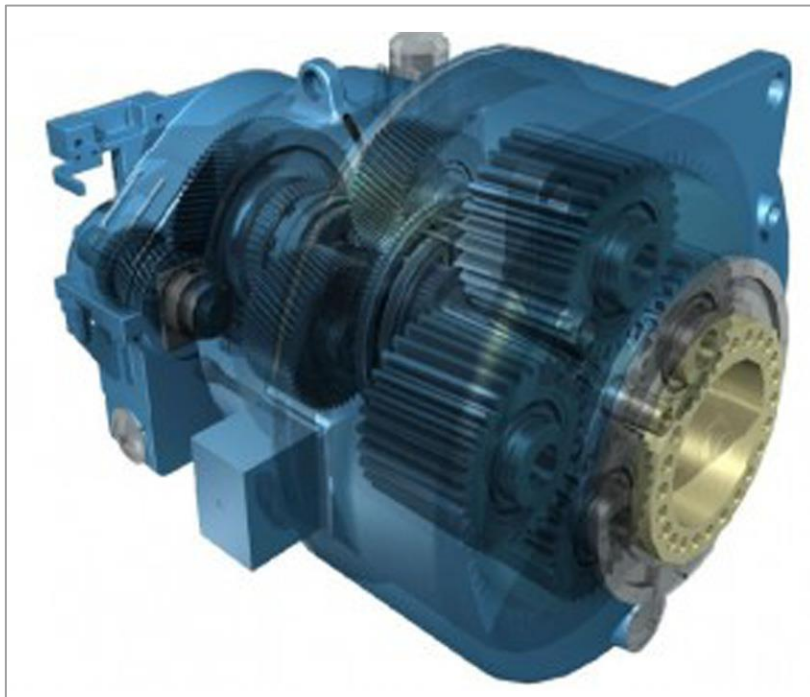
(Yildirim, Gebraeel, & Andy Sun, 2017) como conclusión, propone un marco integrado para el mantenimiento en parques eólicos que combina todo lo anterior y se resumen en estos dos apartados:

- La metodología de análisis predictivo que utiliza datos de sensores en tiempo real para predecir la degradación futura y el tiempo de vida restante de las turbinas eólicas.
- Un modelo de optimización que transforma estas predicciones en un mantenimiento óptimo y en decisiones operativas para parques eólicos.

Gracias a este sistema de monitorización y sensorización de las turbinas se consigue una base de datos en tiempo real para analizar el estado de la maquinaria en comparación a los históricos. Esto es utilizado con frecuencia en las vibraciones, que son un síntoma de que algún elemento del aerogenerador no funciona correctamente. Un método de estudio de estas vibraciones que acaban percibiéndose como ruido en los componentes dentro de la cabina es el método de análisis de ruta de transferencia experimental (TPA) como estudian (Mustafa, Yildiz, & Özkan, 2018) en su artículo sobre la investigación y refinamiento del ruido de la multiplicadora. Estos datos son investigados según el método de análisis de ruta operacional con entradas exógenas (OPAX) para medir y revelar la razón del ruido que produce la multiplicadora, su procedencia y poder aplicar medidas correctoras sobre el error, y así evitar el empeoramiento del resto de componentes, alargando la vida de la multiplicadora y mejorando su rendimiento.

A las vibraciones de multiplicadoras van relacionados fallos de engranajes y rodamientos en la mayoría de las veces. Una manera de que estos problemas puedan evitarse, que se retrase su aparición y que el sistema funcione correctamente es usando unos aceites con características específicas para multiplicadoras. Las máquinas que CETASA usa en sus parques el sistema de lubricación funciona por sumersión parcial de los componentes de la multiplicadora, junto a un sistema de bombeo propio de la multiplicadora, con prefiltro y filtro, muy importantes para que las partículas que pueden provocar erosión se queden en ellos y así poder evitar daños y a su vez avisar e indicar a los mantenedores del estado del aceite lubricante. Es muy importante seleccionar un lubricante que cree una baja fricción de los componentes de transmisión de

potencia, alargando de esta manera la vida útil de la máquina, del lubricante y un aumento de rendimiento de los rodamientos y de los engranajes (Fernandes, Blazquez, Sanesteban, Martins, & Seabra, 2016). Las multiplicadoras usadas en CETASA cuentan con una o dos etapas de engranajes planetarios junto a una o dos etapas paralelas conectadas al eje que da unión al generador, como se ve con detalle en la *Figura 5*. Las pérdidas de potencia que sufren estos elementos más comunes son las pérdidas de fricción entre los dientes que engranan, los rodamientos, las pérdidas de fricción en los sellos la calidad del aceite que hace que todo esto funcione correctamente (Fernandes, Marques, Martins, & Seabra, 2015) y (Marques, Fernandes, Martins, & Seabra, 2014). Las propiedades físicas del lubricante también tienen que tener bajas pérdidas sin carga que contribuyen a disminuir la temperatura de operación del lubricante. Al tener baja temperatura de operación, se consigue minimizar la oxidación y degradación del aceite, teniendo un impacto positivo en la calidad de lubricación y en la protección de la multiplicadora contra fallos y roturas, reduciendo así también los gastos de cambios de aceite más habituales para mantener un buen rendimiento (Fernandes, Blazquez, Sanesteban, Martins, & Seabra, 2016).



*Figura 5: Interior de una multiplicadora donde se aprecian engranajes, rodamientos y los sistemas de ejes planetarios y paralelos (Zhao & Ji, 2015).*

En el diagnóstico de fallos en rodamientos está la dificultad que se encuentran enmascarados por la señal de otras vibraciones, como los engranajes y los ejes. (Shanbr, Elasha, Elforjani, & Teixeira, 2018) estudian un conjunto de técnicas de procesamiento de señal para investigar su viabilidad en la detección de fallos en la multiplicadora, mediante condición estadística, “spectral kurtosis” y análisis envolvente. Gracias al monitoreo y diagnóstico de fallos en las multiplicadoras se recude los costes de operación y mantenimiento aumentando a su vez el rendimiento y la generación de energía. Otros sistemas de análisis sistemático de fallos que se llevan a cabo para encontrar fallos son el microscopio óptico, el microscopio metalográfico, probador de microdureza Vickers, estereomicroscopio tridimensional, el microscopio electrónico de barrido y el espectrómetro de masas de cromatografía de gases e infrarrojos por

transformada de Fourier, entre otros (Gong, Fei, Tang, Yang, Han, & Li, 2017). Los rodamientos de alta velocidad, a la salida de la multiplicadora con el eje de alta velocidad acoplado al generador, soportan cargas radiales y de vibraciones que son susceptibles de fallos, que si no se analizan tempranamente pueden dar lugar a unas roturas más graves en la multiplicadora, llegando al punto de tener que repararla fuera de máquina o cambiarla completamente, con los gastos que ello conlleva a parte de las pérdidas que genera por dejar de producir energía.

Gracias al análisis de datos y las vibraciones que producen estos elementos y al estudio histórico, se puede crear una detección temprana de los fallos con la comparación de estas técnicas. Estos sistemas de detección de fallos se basan en parámetros de monitoreo como la vibración del tren de altas, la temperatura del aceite y de los rodamientos y del contenido de partículas que tiene el aceite y se captan en prefiltro y filtro. Estos datos se analizarán en los archivos de CETASA y se puede apreciar en ellos que son avisos de posibles roturas de elementos de la multiplicadora, teniendo bajos rendimientos, por lo que los equipos de mantenimiento solucionarán estos problemas para evitar roturas y costes mayores en la multiplicadora.

Dentro de los múltiples fallos dinámicos que presentan las multiplicadoras de las turbinas eólicas, como redacta (Zhu, Xu, Liu, Luo, & Zhai, 2014) haciendo un review de todos los autores que hacen mención a estos fallos en diferentes estudios, sirven para especificar en el diseño y modificaciones de las multiplicadoras para mejorar estos fallos. La doble estructura flotante, tanto en el engranaje planetario con pasador flexible como en el engranaje flotante, son un nuevo sistema de estructura para evitar fallos en engranajes y rodamientos. Este sistema se encuentra en estudio y comparación con los demás sistemas para ver su funcionalidad y rendimientos, con el sistema de patillas flexibles se prueban los comportamientos dinámicos de la multiplicadora de una turbina eólica.

La toma de datos en tiempo real de cualquier sistema monitorizado de las turbinas eólicas se realiza gracias al sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), que recopila datos de los componentes de la turbina eólica para analizar el rendimiento y comportamiento del aerogenerador y poder controlarlo remotamente en caso de necesidad. También cumplen con la función de sistemas de almacenamiento, que tiene gran utilidad como se ha explicado anteriormente, para poder hacer análisis comparativos a lo largo del tiempo y comprobar el funcionamiento de las turbinas, multiplicadoras, etc., y poder predecir posibles roturas o fallos en los sistemas. Los SCADA se encargan de la toma de datos, y los propios autómatas programados por la empresa son los que toman las decisiones que se les ha configurado para dar error y/o alarma en el sistema según los cálculos y comparaciones que ellos realizan, mediante los datos que los SCADA han recopilado. Son adecuados para la investigación de problemas de degradación del rendimiento de la turbina por el envejecimiento que supone el paso del tiempo, para poder analizar todos los datos recopilados (Dai, Yang, Cao, Liu, & Long, 2018). El uso de redes neuronales capaces de predecir los parámetros analizados de posibles fallos (Sun, Li, Wang, & Lei, 2016), gracias a los datos actuales y a los datos históricos captados por los SCADA para crear modelos de predicción y así con ellos llevar a cabo un mantenimiento preventivo antes de que se produzcan daños más importantes en la turbina eólica con los consiguientes gastos de operación y mantenimiento.



Como se ha explicado anteriormente y nos explican (Sun, Li, Wang, & Lei, 2016) en la monitorización de las turbinas eólicas gracias a la toma de datos mediante los SCADA, se usan varios tipos de análisis y variables necesarias para la predicción de fallos, como el análisis de vibración, acústico, de temperaturas, del sistema de lubricación y el estado del lubricante, medición de deformación y del rendimiento de los elementos de la turbina para reducir el tiempo de inactividad no programado, que es el que supone grandes pérdidas de producción y económicas.

Una de las herramientas más común en la identificación de anomalías y análisis del rendimiento es la curva de potencia de la turbina eólica, por lo que los investigadores han aplicado diferentes metodologías para monitorear esta curva de potencia basadas en los datos de SCADA, como se indica en (Sun, Li, Wang, & Lei, 2016) y (Marvuglia & Messineo, 2012) que se usaron tres modelos de aprendizaje automático, un regresor de mapeo generalizado (GMR), una red neuronal de regresión general (GRNN) y un perceptrón multicapa de alimentación anticipada (MLP) para controlar las curvas de potencia de un parque eólico. De esta manera se puede controlar si el rendimiento general de turbina está dentro de los parámetros establecidos, y en caso de que se salga de este rango, se estudia dónde puede encontrarse el error gracias al análisis de los datos SCADA y el monitoreo de todos los elementos.

Como (Dao, Staszewski, Barszcz, & Uhl, 2018) investigan y explican el sistema de análisis de datos SCADA basados en la cointegración, es importante la eliminación de los efectos no deseados de la variabilidad ambiental y operativa, el monitoreo de las tendencias de datos, a que las variables monitorizadas se cointegran para crear una estacionariedad que representa la condición normal, por lo que cualquier desviación a ella puede indicar que los procesos y sistemas estudiados ya no operan en condiciones normales. Una vez conseguida la cointegración de las variables y calculados los valores estacionarios, se marcan los rangos fuera de ellos que indican fallos de los elementos, gracias a los datos recogidos por los SCADA, que avisarán a los equipos de mantenimiento y a la empresa para poder realizar las labores necesarias y así evitar problemas en la operación y mantenimiento de los parques eólicos.

Se llega a la conclusión de todas las investigaciones sobre las turbinas eólicas, que el mantenimiento de las multiplicadoras, sus fallos y los sistemas empleados para detectarlos cuanto antes, son de gran importancia para tener un rendimiento óptimo. Además que cada vez son más grandes los aerogeneradores, tanto en tamaño como en potencia, y que cualquier simple avería de los elementos que los componen puede suponer una gran pérdida de producción de energía y a su vez una gran pérdida económica. Para evitar que esto suceda debe implantarse un sistema de diagnóstico de fallos, capaz de analizar los datos recogidos por los diferentes SCADA para detectar cualquier anomalía en el funcionamiento de la maquinaria. De esta manera podrán realizarse labores de mantenimiento preventivo, evitando mayores daños en los elementos a la larga y evitando a su vez la parada de la turbina con las pérdidas económicas que ello supone. También entra en juego el mantenimiento oportunista, revisando visual y auditivamente los diferentes elementos de la turbina por los operarios. Todo esto sujeto al análisis de los datos reales en comparación a los datos históricos para determinar cualquier tipo de variación, ya sean vibraciones, temperaturas elevadas de rodamientos, aceites y diferentes elementos, y ruidos captados por la sensorización de la turbina (Liang, Zuo, & Feng, 2018).

Debido a la problemática del cierre de empresas fabricantes de maquinaria, entre los años 2006 y 2012 se creó una incertidumbre y retraso en la fabricación de recambios y maquinaria ya montada en las turbinas, por lo que las paradas de los aerogeneradores por falta de elementos y recambios aumentó mucho, bajando la disponibilidad de las turbinas y creando grandes pérdidas económicas. Los plazos de suministro de los materiales necesarios para la reparación y/o cambio de multiplicadoras eran excesivos, por lo que los grandes tiempos de parada suponían grandes pérdidas económicas. Debido a estos contratiempos, nacieron empresas de terceros con experiencia en el sector y en la fabricación de materiales necesarios en los recambios de las turbinas que a partir del 2012 eliminaron esta problemática de tiempos de espera y parada de turbinas excesivos.

Las labores de operación y mantenimiento (O&M) de un parque eólico son una tarea elemental para que el funcionamiento del parque sea el óptimo, teniendo rendimientos altos y consiguiendo una larga vida útil de los elementos. Los componentes críticos del aerogenerador como la multiplicadora, generador, rodamientos principales, son elementos que cualquier fallo que les afecte pueden suponer mucho tiempo de inactividad no programado del aerogenerador, por lo que tendrán un gran impacto en la disponibilidad y productividad de la turbina eólica (Pires Leite, Maurício Araújo, & Carvalho Rosas, 2018) y (Nie & Wang, 2013). Por este motivo son importantes las labores de mantenimiento adecuado de todos los elementos de la turbina.

Los principales factores en los que se puede resumir el estado del arte analizado en los que los promotores y propietarios de los parques prestan más interés son los siguientes:

1. Criterios de mantenimiento.
2. Estado y fiabilidad de los parques de turbinas alcanzando los 15 años de vida a través de análisis estadísticos de frecuencia de fallos.
3. Los problemas económicos analizando alargamientos de vida útil ya sea por financiaciones a largo plazo o bien por incertidumbres regulatorias.
4. Tareas de mantenimiento y de reparación al margen de los fabricantes para buscar periodos más breves de suministro de material.
5. Los problemas generados en el suministro para tener recambios y stock posterior al 2012 han sido eliminados gracias a diferentes proveedores y empresas que realizan reparaciones.
6. Sistemas SCADA inteligentes que mejoren el rendimiento de las turbinas.

## 2. OBJETIVOS Y PROPÓSITO DEL ESTUDIO

La realización del análisis de datos de los parques eólicos de CETASA tiene como objetivo principal el saber la parte que afecta la multiplicadora a la disponibilidad total de los parques. Para ello se analizarán todos los errores relacionados con las multiplicadoras, las horas de mantenimiento y de prevención de fallos que afecten al funcionamiento de la máquina entera, dejando de producir energía en esos periodos de tiempo debido a paradas relacionadas con las multiplicadoras.

Tras un análisis de los datos de los SCADA y gracias a la fórmula de disponibilidad se estudia el porcentaje de paradas y errores de la multiplicadora y cómo afectan al resto de la máquina. Además se puede estudiar cada error por individual y así tener en cuenta la importancia que tiene cada uno de ellos, la frecuencia con la que pueden aparecer, el tiempo que hace que la turbina no esté generando y las pérdidas económicas que conllevan cruzando los tiempos de parada con los tiempos de precio de venta de energía y de producción de las turbinas. Una vez analizados todos los datos y errores del año 2016 se aprecian los relacionados con las multiplicadoras, y con ello se puede hacer más hincapié sobre cierto tipo de errores para prevenir que aparezcan, sustituir piezas dañadas en días y épocas con precio de la energía más barata o con velocidades de viento casi nulas consiguiendo con ello que no se impida la producción y generación de energía y evitar dejar de generar en los días con mayores rangos de viento y altos precios de energía. Para ello las labores de mantenimiento y prevención de los errores en las máquinas son primordiales, consiguiendo que el rendimiento de la turbina sea óptimo y con valores de disponibilidad lo más altos posibles, indicando la perfecta regulación y funcionamiento de los aerogeneradores.

Con las disponibilidades, los errores, los precios de energía y las producciones se calcula el total de las pérdidas económicas obtenidas por la falta de generación a causa de los fallos de la multiplicadora. También distinguiremos el “daño” o efecto antes de Mayo del año 2014 y después, debido a que son retribuciones a la energía muy distintas, ya que desaparece el precio fijo de venta de energía, como veremos. El objetivo de obtener estas pérdidas es la de saber si merece la pena o no tener repuestos en los almacenes para solucionar el error inmediatamente sin tener que tener parada la máquina el tiempo que se tarda en reparar la multiplicadora sin dejar de generar energía. Este dato es bastante importante a la hora de gestionar el parque entero, ya que supone una cifra considerable el tener stock en los almacenes, donde los tiempos de parada y falta de generación suponen aproximadamente unas 10 semanas de reparación de la multiplicadora, por lo que estas paradas y falta de generación son de gran magnitud e importantes a la hora de tener en cuenta la disponibilidad de recambios.

Como objetivo secundario, en relación al objetivo principal, lo que se pretende estudiar con este análisis de datos es la gestión de las tareas de mantenimiento, según la frecuencia de los errores y de su importancia, creando mantenimientos oportunistas para la reparación o cambio de cualquier elemento dañado que pueda afectar a la pérdida de rendimiento de la multiplicadora o a posibles futuras roturas con mayor importancia y gravedad, consiguiendo que las turbinas tengan rangos de funcionamiento óptimo con disponibilidades lo más altas posibles.

Como objetivos que complementan a los anteriores y lo que se pretende con este análisis de la disponibilidad de la multiplicadora y el análisis de los datos es conseguir una mejora en el rendimiento y generación:

- Aumento de la confiabilidad y seguridad de la turbina eólica.
- Aumento de la disponibilidad y eficiencia.
- Reducción de los costes de O&M relacionados con repuestos y tareas ineficientes.
- Reducción de la pérdida de beneficios haciendo el mantenimiento preventivo y oportunista en condiciones ambientales favorables.
- Aumento del control de la turbina gracias a la monitorización y a los SCADA.
- Ayuda para tomar la decisión de crear o no stock.

A continuación se desarrolla el estudio estadístico realizado en los parques eólicos de CETASA situados en la zona de Tierras Altas de la provincia de Soria. Este estudio cuenta con el análisis de los datos recogidos por los SCADA de la empresa de 132 aerogeneradores, analizando las multiplicadoras, los errores que les afectan, para poder sacar la disponibilidad de estas máquinas y las pérdidas que suponen sus paradas a la producción y generación de energía.

### 3. DISPONIBILIDAD EN PARQUES EÓLICOS

La disponibilidad es un factor que difiere en su manera de calcularlo dependiendo de quien proporcione el dato, ya sean promotores, mantenedores y fabricantes, teniendo en cuenta según las labores a realizar los tipos de parada de los aerogeneradores.

*“La disponibilidad propiamente dicha es la proporción de tiempo en que un equipo o sistema está en situación operativa, con relación a un determinado periodo de tiempo, medida usualmente dada en tanto por ciento.”* (CETASA, 2001). En el ámbito de la disponibilidad de los distintos componentes de la turbina eólica, es el cociente entre el tiempo disponible para producir y el tiempo total de parada en el cual no se está llegando a generar, que es lo que a la compañía le interesa. A mayor disponibilidad, mayor producción de energía se consigue, por lo que mejor rendimiento tienen las turbinas eólicas. Para poder calcularlo es necesario obtener el tiempo disponible, con la resta entre las horas totales que podría funcionar, el tiempo por paradas de mantenimiento programado y el tiempo de paradas no programadas. La disponibilidad deseada y establecida por contrato entre la empresa propietaria y la mantenedora de un parque debe ser igual o superior al 96 %.

En todos los parques eólicos se cuenta con un tiempo de operaciones que hay que realizarle a la turbina necesariamente para conseguir su perfecto funcionamiento. Estas paradas se les llama “tiempo muerto programado”, donde la turbina se para para realizar labores de mantenimiento necesarias. Sin embargo, cuando una turbina se para de forma inesperada se llama “tiempo muerto no programado”, donde se crean unas pérdidas que no se tenían programadas, donde no solo se pierde tiempo de producción, sino que hasta que se encuentra el problema pasa un tiempo que puede afectar a la tasa de producción antes y después del paro, como por ejemplo en los parques de CETASA las temperaturas muchas veces bajo cero, que influyen en las máquinas ya que hacen bajar mucho las temperaturas de los lubricantes y pueden surgir a posteriori averías cuando se rearmen máquinas. Estos tiempos muertos no programados además pueden aparecer en momentos de alto precio de energía y altas velocidades de viento, siendo la producción máxima, por lo que las pérdidas también son importantes. Sin embargo, cuando se hacen paradas ya programadas, se suelen realizar en días de poco viento, donde la producción es nula, como las pérdidas que se crean (Emerson Process Management).

Por estos motivos, la reducción o eliminación de los paros no programados hace que la disponibilidad de la turbina sea más alta, con una rentabilidad, rendimientos y producciones de energía mayores.

La fórmula de disponibilidad utilizada en este estudio aportada por la empresa según los contratos establecidos con las empresas de O&M es la siguiente:

$$\left( \frac{H_{tot} - H_{par}}{H_{tot}} \right) * 100 \quad (1)$$

Las horas totales hacen referencia a las 8.784 horas que tiene el año bisiesto de 2016, pudiendo estar en funcionamiento los aerogeneradores las 24 horas del día los 366 días del año. Las horas de parada son calculadas en los Excel de datos obtenidos de los SCADA de CETASA, donde se analizan todos los errores y se obtienen las horas exactas de paradas de los aerogeneradores por causas relacionadas con las multiplicadoras.

En el apartado “6. Resultados del análisis de datos y gráficos de los errores” se muestran con detalle las disponibilidades por multiplicadora en los cuatro parques y en cada uno de los 132 aerogeneradores en las *Tablas 3, 4 y 5*.

La disponibilidad también tiene otras maneras de calcularse, dependiendo de quien proporcione el dato, ya sean promotores (disponibilidad económica/energética), mantenedores y fabricantes (disponibilidad técnica) o la disponibilidad operativa que relaciona la producción de un aerogenerador y/o parque eólico partido la producción total teórica de un aerogenerador y/o parque eólico sin indisponibilidades achacables al propio parque (CETASA, 2001). A continuación se mencionan a modo comparativo e informativo las diferentes maneras de calcularlas:

- Disponibilidad técnica: tiene en cuenta únicamente los tiempos de parada que se crean para las labores de mantenimiento de los aerogeneradores y/o parques.

$$\left(1 - \frac{H_{ind}}{H_{tot}}\right) * 100 \quad (2)$$

- Disponibilidad económica: tienen en cuenta los tiempos de parada por fallos, y también tienen en cuenta los periodos de tiempo en el que el viento no es el adecuado para la producción (3-24 m/s). Se tiene en cuenta la generación.

$$\left(1 - \frac{H_{ind}}{H_{tot}}\right) * 100 \quad (3)$$

(Nota: en este caso tan solo se tiene en cuenta las horas que el viento tiene velocidades superiores a 4 m/s e inferiores a 25 m/s)

- Disponibilidad operativa:

$$\frac{\text{Producción (Contadores)}}{\text{Producción (Contadores)} + \text{Producción Pérdida}} \quad (4)$$

Las instalaciones eólicas españolas, en el conjunto del parque eólico, de media son instalaciones con una disponibilidad cercana al 94 %, lo cual indica que existe todavía un margen de mejora en la disponibilidad y rendimiento. Estos valores hacen referencia al total de los elementos de la turbina eólica. Los valores de disponibilidad de la multiplicadora son más altos, en torno al 99 %. El aumento de la disponibilidad aumenta la tasa de retorno de la inversión haciéndola más factible económicamente para los posibles inversores, por lo que valores altos de disponibilidades indicarán rendimientos y resultados económicos factibles.

#### 4. ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA TRATADA Y DESCRIPCIÓN DE LOS PARQUES EÓLICOS

La empresa CETASA cuenta con una cartera de instalaciones renovables que asciende a 100 MW repartidos en cuatro parques eólicos situados en la zona de Tierras Altas de la provincia de Soria (Figura 6). Cuenta con un total de 132 aerogeneradores, en los cuales se realiza el estudio. Todas las turbinas eólicas son tripala, sin embargo no todos los aerogeneradores son de la misma tecnología, ya que no hicieron todos los parques a la vez, por lo que nos encontramos 2 tipos de tecnologías, de paso fijo y paso variable:

- El más antiguo es el Parque eólico de Oncala, con puesta en marcha en el año 2001, que consta de 33 aerogeneradores modelo NegMicon NM48/750 de paso fijo.
- El segundo en instalarse es el Parque eólico de Magaña con aerogeneradores de modelo NegMicon NM52/900 también con turbinas de paso fijo, con su puesta en marcha en el año 2002.
- En el tercero, Parque eólico de Castilfrío, se dio un giro en la apuesta por la tecnología y se cambió a tecnología de paso variable de modelo Made AE52 800 kW, en el año 2003.
- Por último se implanto el Parque eólico El Cayo también con turbinas Made AE52 800 kW, poniéndose en marcha en el año 2004.

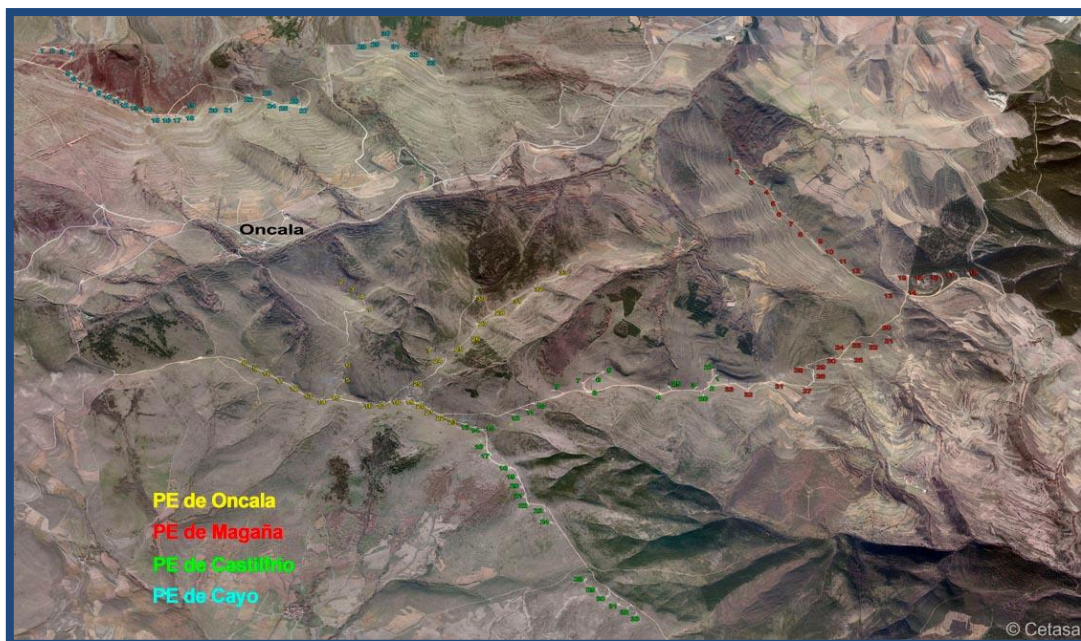


Figura 6: Mapa de la localización de las máquinas de los 4 parques. Fuente: CETASA.

#### 4.1. DATOS GENERALES MULTIPLICADORAS

Las multiplicadoras son un mecanismo de transmisión de potencia desde una velocidad lenta de 25 r.p.m. hasta una velocidad más rápida de 1.500 r.p.m. conectado al generador. La multiplicadora esta compactada y cerrada con su propio sistema de lubricación interno, por inmersión, barboteo y presión. La potencia se transmite a través de varios trenes de engranajes cilíndricos de construcción robusta, todos ellos cementados y rectificados, lo suficientemente dimensionados para evitar flexiones o cualquier otro tipo de deformaciones. Los ejes están apoyados sobre rodamientos de primera calidad, altamente dimensionados para soportar, tanto la carga de los engranajes, como las velocidades de marcha. Todos los elementos están insertados en una carcasa de construcción robusta e indeformable.

Por ejemplo, NEG Micon utiliza unas multiplicadoras fabricadas y diseñadas especialmente para aplicaciones en aerogeneradores. Es común en todos los aerogeneradores que la multiplicadora deba soportar grandes cargas, lo cual hace necesarios un cuidadoso diseño de éste y una especial atención respecto a los coeficientes de seguridad aplicables. La distribución general y el diseño de la carcasa de la multiplicadora se han realizado en estrecha colaboración con el fabricante de transmisiones por engranajes, el cual es un especialista en diseño, cálculo, construcción y producción de dichas transmisiones. La multiplicadora es de tres etapas, siendo la primera de ellas planetaria y los dos restantes de tipo helicoidal y ejes paralelos.

En el siguiente apartado se describen con más detalle cada tipo de multiplicadora usada en cada uno de los parques, con sus características y rangos de funcionamiento al igual que sus curvas de potencia.

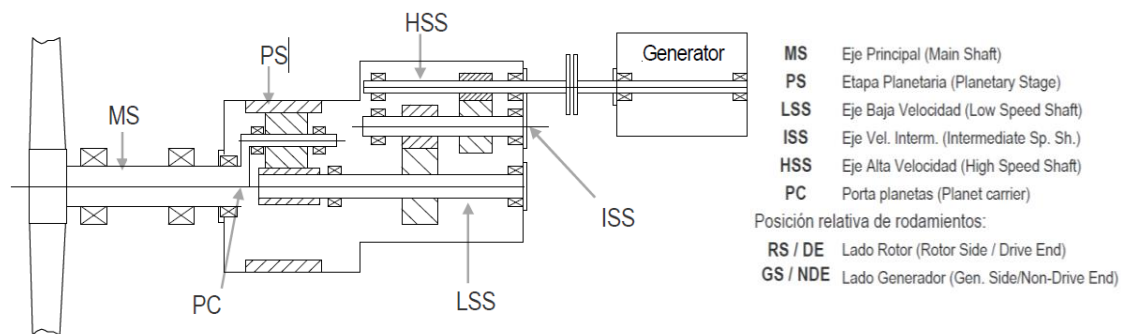


Figura 7: Esquema de una multiplicadora de 1 etapa planetaria y 2 etapas paralelas. Fuente: CETASA.



## 4.2. DATOS ESPECÍFICOS DE LAS TURBINAS INSTALADAS EN CADA PARQUE EÓLICO

### 4.2.1. PARQUE EÓLICO DE ONCALA

En el parque de Oncala nos encontramos con 33 turbinas eólicas Neg Micon NM48/750, con una potencia de 750 kW y una potencia nominal total de 24.750 kW. Estas turbinas tienen un diámetro de palas de 48,2 metros y un área de barrido de 1.825 m<sup>2</sup>, con unas masas de góndola de 22 t, torre 81 t, rotor 12 t, haciendo un total de 115 t. Las velocidades a las que trabaja el rotor varían según las velocidades del viento, aprovechando unos vientos mínimos de 3,5 m/s hasta unas velocidades de viento máximas de 25 m/s, trabajando la turbina eólica a una velocidad de viento nominal de 16 m/s. Esto lleva a que el rotor trabaje con unas 22,4 vueltas/min a velocidad máxima. La multiplicadora de estas turbinas eólicas es del fabricante Flender, con 2 niveles y un ratio de 68. La curva de potencia de estas máquinas es la siguiente, donde se aprecia que la mayor potencia se consigue con vientos nominales de 16 m/s (The Wind Power, 2016):

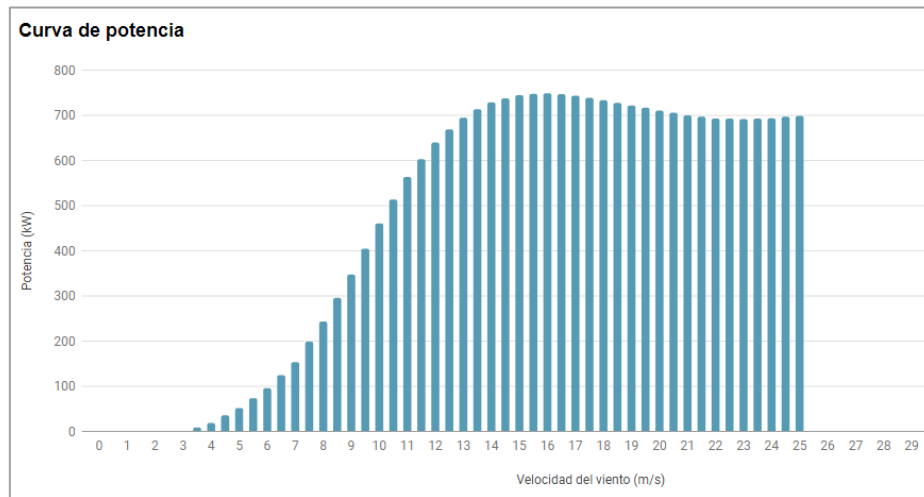


Figura 8: Curva de potencia de la turbina Neg Micon NM48/750. Fuente: The wind power.

### 4.2.2. PARQUE EÓLICO DE MAGAÑA

En el parque de magaña nos encontramos con 33 turbinas eólicas Neg Micon NM52/900, con una potencia de 900 kW cada una de ellas y una potencia nominal de 24.750 kW y una potencia máxima total de 29.700 kW. Estas turbinas tienen un diámetro de palas de 52,2 metros y un área de barrido de 2.141 m<sup>2</sup>, con unas masas de góndola de 24,5 t, torre 97 t, rotor 16,5 t, haciendo un total de 138 t. las velocidades a las que trabaja el rotor varían según las velocidades del viento, aprovechando unos vientos mínimos de 3,5 m/s hasta unas velocidades de viento máximas de 24 m/s, trabajando la turbina eólica a una velocidad de viento nominal de 15 m/s. Esto lleva a que el rotor a velocidad mínima de unas 15 vueltas/min y unas 22,4 vueltas/min a velocidad máxima. La multiplicadora de estas turbinas eólicas es del fabricante Winergy Santos, con 3 niveles y un ratio de 68. La curva de potencia de estas máquinas es la siguiente, donde se aprecia que la mayor potencia se consigue con vientos nominales de 15 m/s (The Wind Power, 2016):

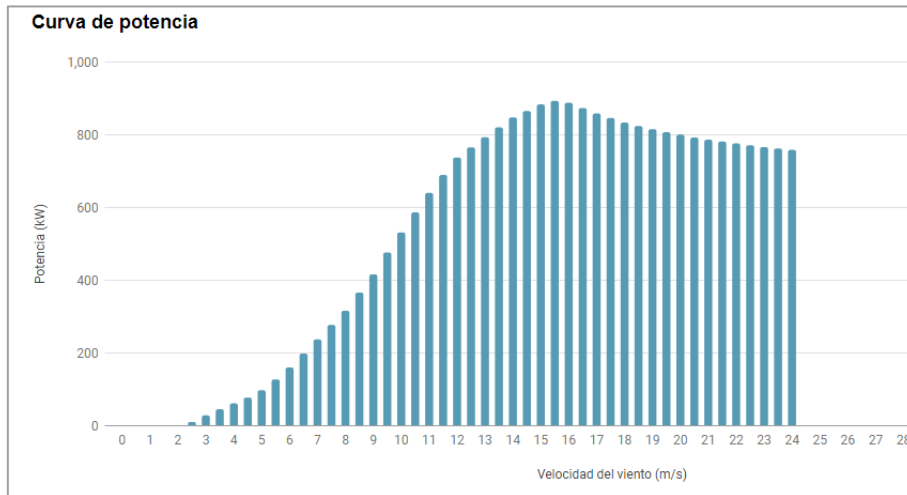


Figura 9: Curva de potencia de la turbina Neg Micon NM52/900. Fuente: The wind power.

#### 4.2.3. PARQUES EÓLICOS DE CASTILFRÍO Y EL CAYO

En estos dos parques se utiliza la misma tecnología, con un total de 66 turbinas eólicas Made AE-52, con una potencia de 800 kW y una potencia nominal total de 49.500 kW. Estas turbinas tienen un diámetro de palas de 52 metros y un área de barrido de 2.124 m<sup>2</sup>, con unas masas de góndola de 28,2 t, torre 90 t, rotor 15,5 t, haciendo un total de 133,7 t. Las velocidades a las que trabaja el rotor varían según las velocidades del viento, aprovechando unos vientos mínimos de 3,5 m/s hasta unas velocidades de viento máximas de 25 m/s, consiguiendo gracias al paso variable de las palas una potencia nominal a partir de los 12 m/s hasta los 25 m/s, donde actúan los frenos por seguridad de la maquinaria. Esto lleva a que el rotor a velocidad mínima de unas 13 vueltas/min y unas 25,7 vueltas/min a velocidad máxima. La multiplicadora de estas turbinas eólicas es del fabricante Tegsa, con 3 niveles y un ratio de 58. La curva de potencia de estas máquinas es la siguiente, donde gracias al paso variable se consigue una potencia nominal de 800kW en un mayor rango de velocidades de viento, desde los 12 m/s hasta los 25 m/s (The Wind Power, 2017):

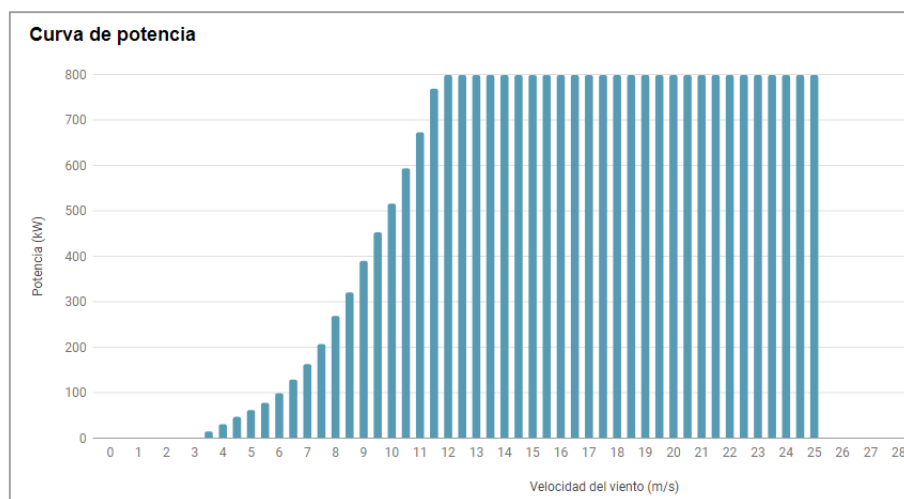
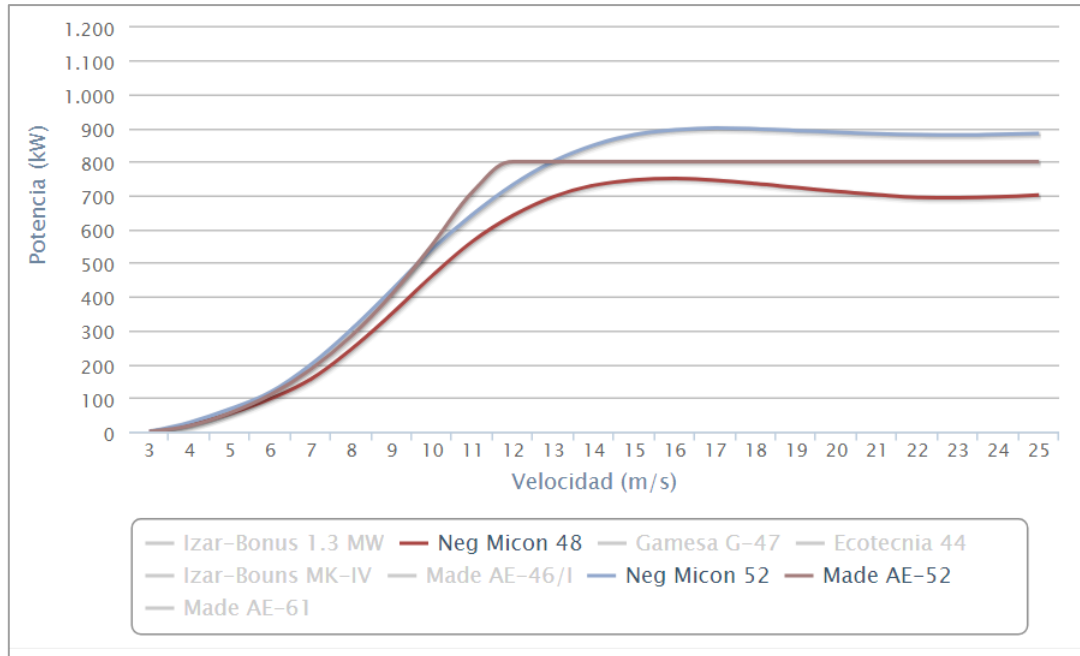


Figura 10: Curva de potencia de la turbina Made AE-52. Fuente: The wind power.

A continuación se muestra en la *Figura 11* una comparativa de los tres tipos de turbina, donde se aprecian los rangos máximos de viento en los que la potencia de las turbinas es máxima y comparando la eficiencia de la tecnología de paso variable AE-52 donde se aprecia en un rango mayor de vientos la potencia máxima en comparación de la tecnología de paso fijo tanto la NM48 como la NM52 (Sotavento Galicia):



*Figura 11: Comparativa de las curvas de potencia en las turbinas NM48, NM52 y AE-52. Fuente: Parque Eólico Experimental Sotavento Galicia.*

Otro tema importante a tener en cuenta cuando se realicen maniobras de cambio de multiplicadora es que antes de proceder a su puesta en marcha, se procederá al llenado de aceite, realizándose siempre por el orificio del tapón del desvaporizador situado en la parte superior de la multiplicadora. La cantidad de aceite aproximada que se debe introducir viene reflejada en la placa de características de cada multiplicadora, comprobando siempre el visor de nivel de aceite para verificar su correcto nivel. Este visor es una mirilla de cristal y el nivel de aceite debe estar comprendido entre las marcas indicadas de máximo y mínimo en la misma mirilla. Para el correcto llenado de aceite de la multiplicadora, hay que tener en cuenta que se encuentren limpias las zonas adyacentes antes de quitar el tapón, usar obligatoriamente aceites nuevos, libres de toda suciedad, esperar una vez relleno el aceite a que se repose para comprobar su nivel. Los litros de aceite aproximados que contienen las multiplicadoras de CETASA son los siguientes:

- Multiplicadora Magaña: 170 Litros
- Multiplicadora Castilfrío y El Cayo: 130 Litros
- Multiplicadora Oncala: 90 Litros

A continuación se muestran las diferentes multiplicadoras que CETASA tiene en los almacenes preparadas y listas para realizarte el cambio en caso de que haya averías.



Figura 12: Multiplicadora de los parques de Castilfrío y El Cayo.

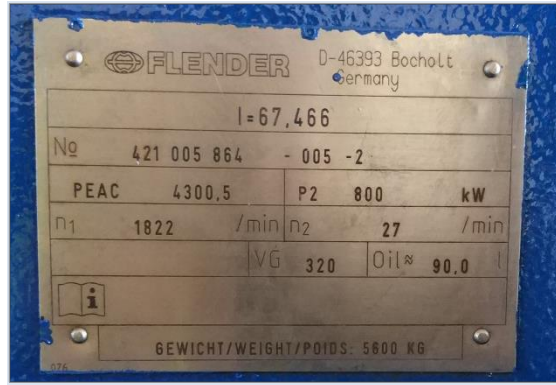


Figura 13: Multiplicadora del parque Oncala.



Figura 14: Multiplicadora del parque Magaña.

En las labores de mantenimiento y revisiones periódicas se recomienda que se verifique el estado de los engranajes de la multiplicadora para así evitar escamas, picados y demás anomalías que empeoren su estado. También será objeto de atención la temperatura, el nivel sonoro y posibles vibraciones, rodamientos y la posible pérdida de estanqueidad observando fugas. Los filtros deben estar en perfectas condiciones, ya que nos indicaran el estado del lubricante, observando si están colmatados de partículas que indiquen desperfectos en la multiplicadora. En las revisiones semestrales y anuales se comprobará:

- El nivel de aceite y se rellenará en caso necesario.
- La ausencia de fugas en los ejes de entrada y de salida, así como por las tapas y en los conductos de lubricación.
- El estado de los tornillos con un par de apriete adecuado.
- Mirar y anotar la presión de trabajo del circuito de engrase, comprobando que el aceite circula por todos los conductos.
- Se observará la ausencia de ruidos extraños y de vibraciones.
- La ausencia de calentamientos extraños, tanto en la carcasa como en las tapas de los rodamientos y se anotará la temperatura de trabajo en ese momento y la potencia producida.
- El nivel de colmatación del filtro.
- Que la junta rotativa gira con toda facilidad y la no existencia de fugas.



## 5. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE DATOS

Para la realización de este estudio con la finalidad de saber la indisponibilidad que ha tenido a lo largo de todo el año 2016 las multiplicadoras de cada uno de los parques de la empresa CETASA y así con esos resultados poder sacar las pérdidas económicas relacionadas a dichas paradas de los aerogeneradores, ha sido necesaria la descarga de los datos acumulados en los SCADA de Gamesa y Vestas, empresas mantenedoras de los parques, a los cuales tiene acceso CETASA como empresa propietaria de los parques. Los datos descargados en un principio para poder sacar los errores que han tenido los aerogeneradores han sido los ficheros Excel "ERRORES 2016" de Castilfrío, El Cayo, Oncala y Magaña. En este documento aparecen todos los errores y alarmas que ha sufrido cada máquina, ya sea por vibraciones, vientos altos, paradas de emergencia y errores de cada una de las partes, como el generador, multiplicadora, veleta, transformador, diferentes bombas y sistemas electrónicos, entre otros. En la *Tabla 1* se aprecia el recuento de los datos, de las 132 máquinas totales, que aparecen en dicho Excel suponiendo un total de 68.893 filas de Excel en las que en cada una de ellas se subdivide en:

- Hora de comienzo del error
- Hora final del error
- Número de cada máquina
- Código del error
- Nombre de error
- Duración de cada error

*Tabla 1: Recuento total de filas de todos los errores del archivo Excel "ERRORES 2016" por cada parque.*

| MES          | ERRORES       |              |               |               |
|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
|              | Castilfrío    | El Cayo      | Magaña        | Oncala        |
| Enero        | 690           | 1.867        | 4.524         | 1.759         |
| Febrero      | 1.525         | 1.858        | 4.117         | 1.521         |
| Marzo        | 1.056         | 1.064        | 7.352         | 4.401         |
| Abril        | 1.181         | 779          | 5.150         | 3.323         |
| Mayo         | 1.128         | 794          | 3.200         | 3.038         |
| Junio        | 635           | 1.378        | 264           | 586           |
| Julio        | 586           | 737          | 721           | 866           |
| Agosto       | 816           | 747          | 243           | 512           |
| Septiembre   | 1.002         | 671          | 860           | 888           |
| Octubre      | 373           | 502          | 531           | 970           |
| Noviembre    | 942           | 523          | 1.586         | 1.263         |
| Diciembre    | 690           | 423          | 415           | 703           |
| <b>TOTAL</b> | <b>10.624</b> | <b>9.476</b> | <b>28.963</b> | <b>19.830</b> |

En la siguiente imagen (*Figura 15*), se muestra una pequeña parte del conjunto de datos, apreciándose en la parte inferior como están distribuidos por meses. En el conjunto de todo el documento, solo hay que tener en cuenta los datos relacionados con los errores que afectan a la multiplicadora, como los que aparecen coloreados de azul claro. Esos datos están relacionados con un código, por lo que se crea un filtrado de los códigos de error, borrando el resto de datos que aparecen en el documento ya que no se van a tener en cuenta.



|     | A                   | B                   | C       | D    | E                             | F        |
|-----|---------------------|---------------------|---------|------|-------------------------------|----------|
| 1   | Comienzo            | Fin                 | Máquina | Code | Texto                         | Duración |
| 89  | 02/12/2016 13:43:15 | 02/12/2016 14:09:58 | 22      | 1400 | Llave de Mantenimiento Activa | 0:26:43  |
| 90  | 02/12/2016 14:09:48 | 02/12/2016 14:12:40 | 22      | 2088 | Baja Presión CH               | 0:02:52  |
| 91  | 02/12/2016 14:12:40 | 02/12/2016 14:13:36 | 22      | 2068 | Llave CH                      | 0:00:56  |
| 92  | 02/12/2016 11:20:39 | 02/12/2016 14:22:56 | 24      | 2097 | Llave Rotor                   | 3:02:17  |
| 93  | 02/12/2016 14:12:35 | 02/12/2016 14:29:40 | 22      | 1400 | Llave de Mantenimiento Activa | 0:17:05  |
| 94  | 02/12/2016 22:22:43 | 03/12/2016 10:08:45 | 1       | 2137 | Err WD BusCAN                 | 11:46:02 |
| 95  | 02/12/2016 13:58:01 | 02/12/2016 14:49:29 | 32      | 2053 | Termico Bomba Mult.           | 0:51:28  |
| 96  | 02/12/2016 14:50:08 | 02/12/2016 14:50:37 | 22      | 2062 | Sensor RPM VIB                | 0:00:29  |
| 97  | 02/12/2016 14:11:55 | 02/12/2016 14:50:44 | 32      | 1400 | Llave de Mantenimiento Activa | 0:38:49  |
| 98  | 02/12/2016 14:54:09 | 02/12/2016 14:57:46 | 22      | 2062 | Sensor RPM VIB                | 0:03:37  |
| 99  | 02/12/2016 14:49:29 | 02/12/2016 14:58:04 | 32      | 2097 | Llave Rotor                   | 0:08:35  |
| 100 | 02/12/2016 14:58:04 | 02/12/2016 14:58:09 | 32      | 2053 | Termico Bomba Mult.           | 0:00:05  |
| 101 | 08/12/2016 23:52:58 | 09/12/2016 0:30:05  | 32      | 2056 | Temp. Mult.                   | 0:37:07  |
| 102 | 05/12/2016 3:05:48  | 05/12/2016 8:05:06  | 27      | 2163 | CF Fallo Vcc                  | 4:59:18  |
| 103 | 02/12/2016 15:03:36 | 02/12/2016 15:05:11 | 32      | 2053 | Termico Bomba Mult.           | 0:01:35  |
| 104 | 16/12/2016 12:29:34 | 16/12/2016 12:31:34 | 4       | 2090 | Vibraciones VIB               | 0:02:00  |
| 105 | 16/12/2016 12:51:46 | 16/12/2016 12:55:22 | 4       | 2076 | Exc. Vibrac VIB               | 0:03:36  |
| 106 | 02/12/2016 15:05:46 | 02/12/2016 15:06:16 | 32      | 2079 | Sensor Freno A                | 0:00:30  |
| 107 | 02/12/2016 15:06:16 | 02/12/2016 15:07:57 | 32      | 1400 | Llave de Mantenimiento Activa | 0:01:41  |
| 108 | 02/12/2016 15:06:05 | 02/12/2016 15:14:54 | 22      | 2062 | Sensor RPM VIB                | 0:08:49  |
| 109 | 12/12/2016 5:41:16  | 12/12/2016 8:49:37  | 15      | 2055 | Caudal Mult.                  | 3:08:21  |
| 110 | 12/12/2016 8:51:59  | 12/12/2016 8:52:58  | 15      | 2116 | Ree. Bomba Mult               | 0:00:59  |
| 111 | 02/12/2016 15:16:30 | 02/12/2016 15:49:29 | 22      | 2062 | Sensor RPM VIB                | 0:32:59  |

Figura 15: Ejemplo de la base de datos, coloreados los diferentes errores a tener en cuenta.

Para hacer la comparativa de cuales de todos estos datos son los que se necesitan y hay que tener en cuenta a la hora de analizarlos y usarlos en la fórmula de disponibilidad, es necesaria la descarga del archivo de las Ordenes de Trabajo “BD MNT0”, en el que aparecen los históricos de los mantenimientos y reparaciones realizadas en los aerogeneradores, explicados cada uno de ellos con las labores que se realizan en la máquina, los tiempos que los operarios actúan sobre ella, material que usan y el día, hora y tiempos que se tarda en realizar cada orden.

Una vez descargados estos dos archivos ya se puede empezar a analizar los datos y errores. Cada parque tiene su propio Excel, por lo que se ha elegido el método de trabajo de empezar y acabar un parque antes de comenzar con el siguiente, avanzando máquina a máquina durante el año completo hasta tener analizadas las 33 máquinas de cada parque. La primera tarea a realizar es la de filtrar los errores relacionados con la multiplicadora, los que se pueden apreciar en la *Imagen 1* coloreados de azul claro, los que la máquina da alarmas y errores que tienen que ser solucionados para que pueda volver a su correcto funcionamiento el aerogenerador y producir energía. Una vez seleccionados los códigos de error y nombres de estos errores, se pueden borrar los demás para reducir la magnitud de datos del Excel. En el archivo de las Órdenes de Trabajo se observa máquina a máquina las operaciones que se le había realizado y a su vez se compara con el Excel “ERRORES 2016” para marcar el error de la multiplicadora, con el tiempo de duración y de las tareas que se le han realizado.

Al acabar de analizar las 33 máquinas de un parque, se quedan marcados los errores, su nombre, descripción y la duración de cada uno de ellos, por lo que se puede hacer una suma total por máquina y por parque de las horas de inactividad para poder aplicar posteriormente la fórmula de disponibilidad. Para calcular la disponibilidad de cada máquina, se seleccionan los errores y tiempos de cada una de las 33 máquinas, se aplica la fórmula de disponibilidad de la



multiplicadora y se agrupan, como se aprecia en la *Tabla 5*, todas las máquinas y así poder calcular la disponibilidad máquina a máquina y la total de cada parque.

La duración de este proceso de análisis de los 4 parques ha sido una tarea de larga duración, algo más de 2 meses, ya que cada error, aunque sea el mismo error en una máquina que en otra, conlleva tiempos y tipos de actuación diferentes, por lo que el análisis de uno a uno de los errores se tiene que hacer minuciosamente y comparando ambos Excel.

Una vez analizados los datos y calculadas todas las horas de inactividad causadas por los errores, se agrupan según el tipo que sean en una tabla específica para tener los sumatorios de todos los grupos de errores. Con esta tabla se puede crear el gráfico circular 3D para representar los errores, el % que suponen del total y los tiempos de parada. Los gráficos de los cuatro parques se muestran más adelante en los *Gráficos 1, 2, 3 y 4*.

Para el cálculo de las pérdidas económicas relacionadas con los errores de multiplicadoras analizados en los datos anteriormente mencionados, es necesario el uso del precio de la energía (€/MWh) y los valores de las producciones de las máquinas colindantes al aerogenerador que tiene el error por multiplicadora (KWh).

- Los datos del precio de la energía los he obtenido de la página oficial del OMIE (OMIE), donde se pueden descargar los precios horarios de la energía. La magnitud de estos datos equivale a los 366 días del año 2016, con las 24 horas de cada día, viniendo ya calculada la media diaria del precio de la energía, por lo que la cantidad de datos tratada hace un total de 9.150 datos.

$$366 \text{ días/año} \cdot (24 \text{ horas} + 1 \text{ media diaria}) = \mathbf{9.150 \text{ datos totales del precio de energía}}$$

- Los archivos de las producciones, descargados de los SCADA de CETASA, tienen datos de medida tomados diezminutalmente, por lo que a lo largo de todo el año 2016 obtenemos un total de 52.704 filas de datos en las que se señala la hora de la toma de cada dato, con sus 33 columnas relacionadas con los aerogeneradores de cada parque.

$$6 \text{ datos hora} \cdot 24 \text{ horas/día} \cdot 366 \text{ días} \cdot 33 \text{ máquinas} = 1.739.232 \text{ datos cada parque}$$

$$1.739.232 \text{ datos} \cdot 4 \text{ parques} = \mathbf{6.956.928 \text{ datos producción totales}}$$

Con los datos descargados del OMIE del precio de la energía por hora, lo que se tiene que hacer es relacionar cada uno de los errores, con el precio de la energía justo en el momento en que este error se está produciendo. Cuando el error tenga una duración inferior a una hora o su duración esté dentro de un intervalo de una hora, cogeremos ese dato. Sin embargo, si el error es de más duración o abarca varios precios de hora, lo que hay que hacer es la media de los precios de la energía en el periodo de duración del error. También hay que tener en cuenta que muchas veces este precio de energía tiene mucha variación dependiendo del momento del día en el que nos encontremos, por lo que habrá que hacer un cálculo más específico hora a hora en relación a la producción de la máquina, para obtener unos resultados exactos de las pérdidas económicas. Esto mismo también habrá que tenerlo en cuenta en días con producciones variables, en los que los cambios de velocidades del viento sean de gran magnitud,

por lo que la máquina en un mismo error podrá tener variaciones de valores mínimos y máximos de producción.

Los datos de producciones del Excel descargado del SCADA nos sirven para saber lo que estaría produciendo la máquina que se encuentra parada en a lo largo de la duración del error. Para ello se hará la media de las producciones de las dos máquinas colindantes a la máquina que se encuentra parada y así aproximar la producción que tendría esta máquina en caso que estuviera en marcha, ya que al estar parada los contadores de producción de energía se encuentran a 0. En la *Tabla 2* se muestran las máquinas colindantes a cada una de las máquinas para calcular su producción.

*Tabla 2: Máquinas colindantes de las 33 máquinas de los cuatro parques.*

| MÁQUINA | MÁQUINAS COLINDANTES |         |        |        |
|---------|----------------------|---------|--------|--------|
|         | CASTILFRÍO           | EL CAYO | MAGAÑA | ONCALA |
| 1       | 2-27                 | 2-3     | 2-3    | 4-3    |
| 2       | 1-3                  | 1-3     | 1-3    | 3-4    |
| 3       | 25-26                | 2-4     | 2-4    | 2-4    |
| 4       | 25                   | 2-3     | 3-5    | 1-3    |
| 5       | 6-7                  | 6-7     | 4-6    | 6      |
| 6       | 5-7                  | 5-7     | 5-7    | 5      |
| 7       | 6-8                  | 6-8     | 6-8    | 24-25  |
| 8       | 6-7                  | 7-9     | 7-9    | 9-10   |
| 9       | 7-10                 | 8-10    | 8-10   | 8-10   |
| 10      | 9-11                 | 9-11    | 9-11   | 9-11   |
| 11      | 10-12                | 10-12   | 10-12  | 10-12  |
| 12      | 10-11                | 11-13   | 11-13  | 11-13  |
| 13      | 14-15                | 12-14   | 14-19  | 12-14  |
| 14      | 13-15                | 13-15   | 13-19  | 13-15  |
| 15      | 13-14                | 14-16   | 16-19  | 14     |
| 16      | 15-17                | 15-17   | 15-17  | 17     |
| 17      | 16-18                | 16-18   | 16-18  | 16-18  |
| 18      | 17-19                | 17-19   | 17-16  | 17-19  |
| 19      | 18-20                | 18-20   | 14-15  | 18-20  |
| 20      | 19-21                | 19-21   | 21     | 19-21  |
| 21      | 20-22                | 20-22   | 20-22  | 20-22  |
| 22      | 21-23                | 21-23   | 21-23  | 21-23  |
| 23      | 22-24                | 22-24   | 22-24  | 22     |
| 24      | 22-23                | 23-25   | 23-30  | 7-25   |
| 25      | 3-4                  | 24-26   | 24-30  | 7-24   |
| 26      | 2-3                  | 25-27   | 28-29  | 25-27  |
| 27      | 1-2                  | 25-26   | 26-31  | 26-28  |
| 28      | 29-30                | 29-30   | 29-26  | 27-31  |
| 29      | 28-30                | 28-30   | 28-30  | 24     |
| 30      | 29-31                | 29-31   | 25-29  | 28-31  |
| 31      | 30-32                | 30-32   | 27-32  | 28-32  |
| 32      | 31-33                | 31-33   | 31-33  | 31-33  |
| 33      | 31-32                | 32      | 32     | 32     |

Habrá que tener en cuenta los días de variaciones de viento notables para no hacer la media de los valores de producción, sino calcularlos hora a hora con los precios de energía específicos.

Con los datos de las producciones de los aerogeneradores y los datos del precio de la energía en el periodo de tiempo que se encuentra parada la máquina por cada error, se puede calcular las pérdidas económicas que ha tenido la máquina parada al no poder generar, multiplicando estos valores junto al tiempo de parada de la máquina:

$$\text{Pérdidas}_{\text{error}} = \text{Tiempo del error} \cdot \text{Precio energía} \cdot \text{Producción de la máquina} \quad (5)$$

(€)                      (hh:mm:ss)                      (€/MWh)                      (MWh)

En el siguiente ejemplo (Figura 16) se muestran varios tipos de errores estudiados y calculados sus tiempos de error, precio de la energía y producción, y con la fórmula anterior se calculan las pérdidas económicas de cada tipo de error. Se aprecia en el error “Bomba” que debido a que hay gran cambio en el precio de la energía y en la producción, no se realiza la media de toda la duración del error, sino que este se divide según los valores del precio de la energía y de las producciones, haciendo el cálculo más preciso agrupando el error en periodos de tiempo similares en precio de energía y producciones, para que el resultado final sea más exacto en comparación al resultado que daría calcular la media de energía y producciones directamente:

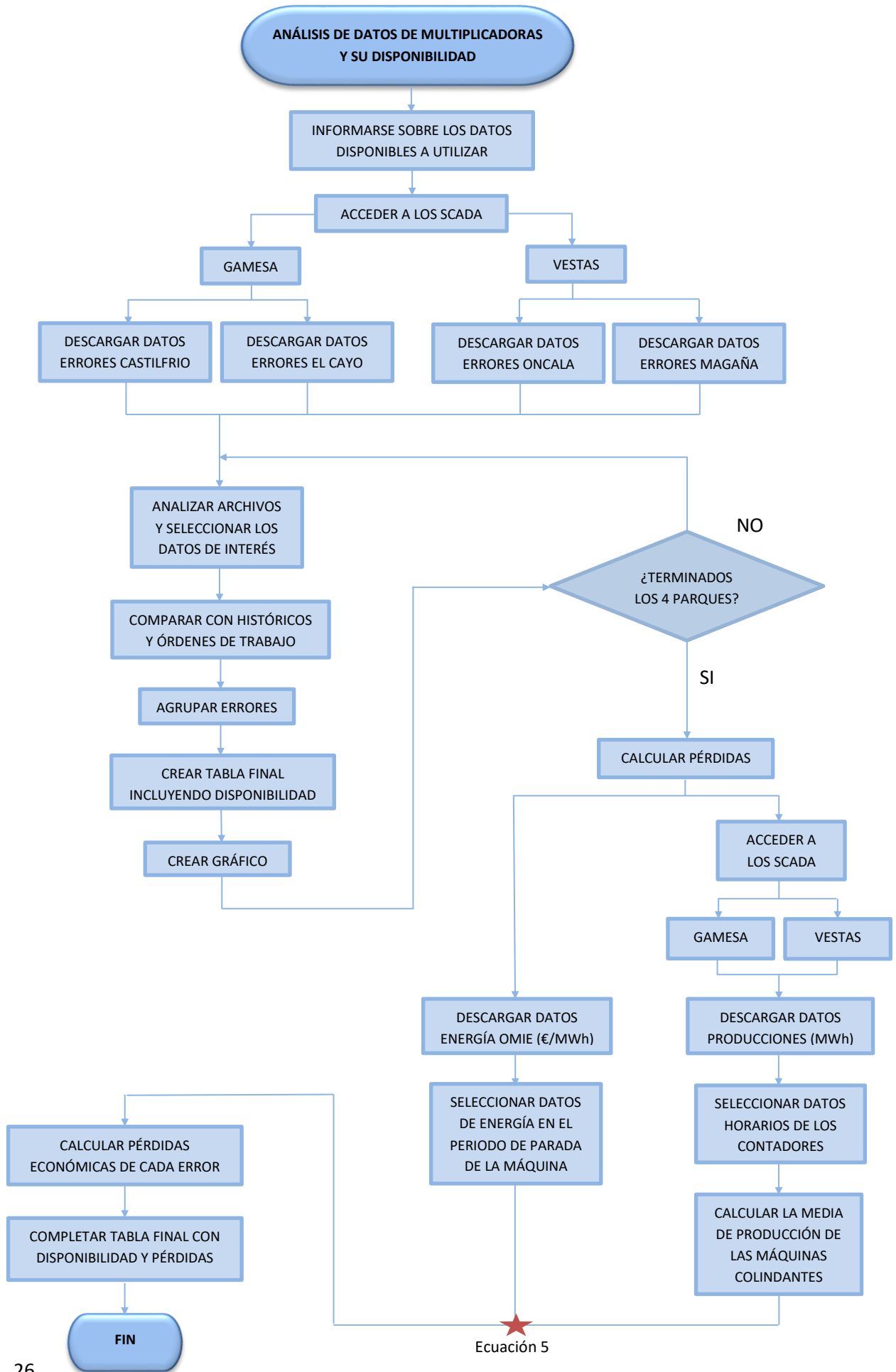
| TIPO ERROR          | TIEMPO ERROR | ENERGÍA | PRODUCCIÓN | PERDIDAS |
|---------------------|--------------|---------|------------|----------|
| Nivel Multiplicador | 3:02:00      | 36,89   | 0,589      | 65,9089  |
| Videoscopio         | 4:14:04      | 25,08   | 0,006      | 0,6372   |
| Caudal Mult.        | 3:36:22      | 32,24   | 0,355      | 41,2727  |
| Caudal Mult.        | 0:56:04      | 29,55   | 0,160      | 4,4181   |
| Termico Bomba Mu    | 0:00:40      | 29,19   | 0,070      | 0,0227   |
| Caudal Mult.        | 0:13:58      | 29,19   | 0,070      | 0,4756   |
| Bomba               | 10:20:30     |         |            | 70,1840  |

↓

| HORAS    | horas   | energía | producción | pérdidas |
|----------|---------|---------|------------|----------|
| 10:20:30 | 1:08:10 | 14,50   | 0,2010     | 3,3112   |
|          | 3:00:00 | 13,78   | 0,0110     | 0,4547   |
|          | 6:12:20 | 27,80   | 0,3850     | 66,4181  |

Figura 16: Ejemplo del cálculo de las pérdidas en diferentes errores.

A continuación se muestra un flujograma con los pasos anteriormente explicados y seguidos para hacer el análisis de datos y cálculo de disponibilidad y pérdidas.



## 6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DATOS Y GRÁFICOS DE LOS ERRORES

En este apartado se va a analizar los resultados obtenidos del análisis de datos realizado en los parques eólicos de Tierras Altas, agrupando en tablas los resultados de cada uno de los parques y más adelante los gráficos en los que se apreciará el total de las horas y porcentaje de los errores de cada parque.

### 6.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DATOS

A continuación se muestran las *Tablas 3 y 4* del conjunto de los cuatro parques estudiados según el tipo de tecnología usada, en el año 2016, donde aparecerá el recuento total de las horas de parada, la disponibilidad, las pérdidas totales y la producción anual.

*Tabla 3: Recuento total de resultados de los parques con tecnología de paso variable en 2016.*

| PARQUE     | HORAS PARADA | DISPONIBILIDAD | PÉRDIDAS (€) | PRODUCCIÓN (MWh) |
|------------|--------------|----------------|--------------|------------------|
| Castilfrío | 2.957:15:00  | 98,9798 %      | 28.586,72    | 62.734.840       |
| El Cayo    | 2.664:09:14  | 99,081 %       | 17.912,90    | 59.230.130       |

*Tabla 4: Recuento total de resultados de los parques con tecnología de paso fijo en 2016.*

| PARQUE | HORAS PARADA | DISPONIBILIDAD | PÉRDIDAS (€) | PRODUCCIÓN (MWh) |
|--------|--------------|----------------|--------------|------------------|
| Oncala | 269:02:30    | 99,907 %       | 1.553,52     | 53.816.710       |
| Magaña | 140:27:32    | 99,952 %       | 493,47       | 59.065.670       |

Lo que se aprecia en estos resultados del estudio de los errores es la diferencia de horas de parada por multiplicadora que han tenido entre la tecnología de paso fijo de los parques de Oncala y Magaña (NegMicon NM48/750 y NM52/900) y la tecnología de paso variable de Castilfrío y El Cayo (Made AE52 800 kW) y las diferencias de producción que existen entre las distintas tecnologías usadas.

El diferente diseño que tiene cada una de las multiplicadoras y en general la turbina entera en relación a la tecnología utilizada es donde se aprecian las diferencias de errores y pérdidas, ya que la tecnología de paso variable sí que ha tenido mayores horas de parada y pérdidas económicas, pero la producción es mayor que en las de paso fijo, por lo que los beneficios totales de cada aerogenerador son mayores. A pesar de la diferencia de errores y disponibilidades entre distintas tecnologías, la tecnología de paso variable de Castilfrío y El Cayo tiene mejores rendimientos y unas producciones de energía superiores a la otra tecnología. El diseño de las turbinas de paso fijo estaba más definido y probado en el momento en el que se colocaron los parques de CETASA, sin embargo las turbinas de paso variable llevaban menos tiempo en el mercado, por lo que se llegan a producir más errores en estas turbinas, compensándose con una mayor producción y rentabilidad.

En la *Tabla 5* se muestran desglosados los datos de las *Tablas 3 y 4* para cada una de las 33 máquinas de cada parque, mostrándose las horas de parada que ha tenido cada una de las máquinas debido a los errores analizados, el porcentaje de disponibilidad a lo largo del año de la multiplicadora, calculado con la fórmula de disponibilidad y las pérdidas que han supuesto todos los errores calculadas con el precio de energía y las producciones en cada tramo horario.

Tabla 5: Recuento de las horas de parada, disponibilidad y pérdidas económicas de los cuatro parques en 2016.

| Máquina      | CASTILFRÍO        |                |                    | EL CAYO           |                |                    | ONCALA           |                |                   | MAGAÑA           |                |                 |
|--------------|-------------------|----------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|-----------------|
|              | Horas parada      | Disponibilidad | Pérdidas           | Horas parada      | Disponibilidad | Pérdidas           | Horas parada     | Disponibilidad | Pérdidas          | Horas parada     | Disponibilidad | Pérdidas        |
| 1            | 235:40:50         | 97,317%        | 681,22 €           | 9:30:42           | 99,892%        | 116,18 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 4,72 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 6,01 €          |
| 2            | 21:23:17          | 99,757%        | 79,68 €            | 3:00:00           | 99,966%        | 17,14 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 20,70 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 4,91 €          |
| 3            | 746:07:51         | 91,506%        | 7.052,89 €         | 57:10:16          | 99,349%        | 371,65 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 17,71 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 7,57 €          |
| 4            | 17:38:12          | 99,799%        | 21,64 €            | 8:18:07           | 99,905%        | 111,67 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 18,99 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 57,50 €         |
| 5            | 465:52:13         | 94,696%        | 5.891,01 €         | 14:18:45          | 99,837%        | 18,05 €            | 41:56:55         | 99,522%        | 107,78 €          | 3:00:00          | 99,966%        | 0,60 €          |
| 6            | 65:27:30          | 99,255%        | 378,84 €           | 21:20:54          | 99,757%        | 17,32 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 7,17 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 8,01 €          |
| 7            | 61:40:44          | 99,298%        | 395,93 €           | 38:25:12          | 99,563%        | 158,42 €           | 7:53:35          | 99,910%        | 2,42 €            | 11:34:08         | 99,868%        | 16,48 €         |
| 8            | 36:38:32          | 99,583%        | 345,70 €           | 4:00:00           | 99,954%        | 7,57 €             | 7:42:04          | 99,912%        | 107,85 €          | 3:00:00          | 99,966%        | 0,85 €          |
| 9            | 6:02:00           | 99,931%        | 4,59 €             | 21:43:35          | 99,753%        | 15,76 €            | 5:00:00          | 99,943%        | 53,39 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 1,15 €          |
| 10           | 6:01:05           | 99,931%        | 24,61 €            | 2:00:00           | 99,977%        | 9,76 €             | 16:57:37         | 99,807%        | 76,25 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 5,04 €          |
| 11           | 6:30:00           | 99,926%        | 55,96 €            | 423:59:42         | 95,173%        | 2.936,75 €         | 11:53:22         | 99,865%        | 144,42 €          | 3:00:00          | 99,966%        | 5,37 €          |
| 12           | 5:00:00           | 99,943%        | 20,58 €            | 13:41:14          | 99,844%        | 33,00 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 3,43 €            | 5:53:09          | 99,933%        | 29,99 €         |
| 13           | 8:28:27           | 99,904%        | 48,82 €            | 100:06:26         | 98,860%        | 743,78 €           | 2:38:51          | 99,970%        | 16,56 €           | 17:27:42         | 99,801%        | 9,42 €          |
| 14           | 48:11:35          | 99,451%        | 458,86 €           | 2:00:00           | 99,977%        | 44,28 €            | 4:49:39          | 99,945%        | 21,98 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 0,85 €          |
| 15           | 13:58:31          | 99,841%        | 397,11 €           | 15:45:01          | 99,821%        | 147,69 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 5,49 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 2,32 €          |
| 16           | 21:25:21          | 99,756%        | 63,48 €            | 49:49:59          | 99,433%        | 289,48 €           | 20:27:12         | 99,767%        | 55,22 €           | 12:00:35         | 99,864%        | 50,76 €         |
| 17           | 19:55:21          | 99,773%        | 196,69 €           | 12:25:45          | 99,859%        | 115,09 €           | 8:43:18          | 99,901%        | 20,31 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 14,66 €         |
| 18           | 6:00:00           | 99,932%        | 57,81 €            | 4:00:35           | 99,954%        | 5,82 €             | 3:00:00          | 99,966%        | 16,07 €           | 5:08:08          | 99,942%        | 16,08 €         |
| 19           | 60:27:23          | 99,312%        | 402,12 €           | 171:29:06         | 98,048%        | 468,09 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 22,85 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 19,98 €         |
| 20           | 410:01:34         | 95,332%        | 3.580,90 €         | 26:24:58          | 99,699%        | 79,50 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 1,58 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 62,10 €         |
| 21           | 27:13:47          | 99,690%        | 161,71 €           | 953:51:24         | 89,141%        | 8.186,51 €         | 5:00:00          | 99,943%        | 19,01 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 0,50 €          |
| 22           | 8:43:41           | 99,901%        | 55,23 €            | 27:05:42          | 99,692%        | 124,87 €           | 4:00:00          | 99,954%        | 42,51 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 0,51 €          |
| 23           | 266:25:19         | 96,967%        | 5.188,97 €         | 2:00:00           | 99,977%        | 5,47 €             | 7:09:38          | 99,918%        | 71,40 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 0,22 €          |
| 24           | 14:44:00          | 99,832%        | 144,23 €           | 320:17:14         | 96,354%        | 1.061,63 €         | 5:40:23          | 99,935%        | 4,11 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 3,15 €          |
| 25           | 7:00:00           | 99,920%        | 93,59 €            | 2:00:00           | 99,977%        | 0,00 €             | 4:35:23          | 99,948%        | 7,47 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 10,64 €         |
| 26           | 15:04:51          | 99,828%        | 32,47 €            | 2:00:05           | 99,977%        | 0,00 €             | 3:00:00          | 99,966%        | 36,29 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 14,23 €         |
| 27           | 22:30:51          | 99,744%        | 49,00 €            | 132:27:55         | 98,492%        | 1.078,37 €         | 7:00:00          | 99,920%        | 18,77 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 1,78 €          |
| 28           | 31:05:10          | 99,646%        | 308,09 €           | 6:00:00           | 99,932%        | 66,95 €            | 36:18:22         | 99,587%        | 442,90 €          | 6:21:18          | 99,928%        | 63,89 €         |
| 29           | 94:19:10          | 98,926%        | 667,56 €           | 123:02:28         | 98,599%        | 1.182,40 €         | 3:00:00          | 99,966%        | 0,00 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 2,48 €          |
| 30           | 68:19:02          | 99,222%        | 495,35 €           | 38:40:41          | 99,560%        | 157,53 €           | 10:28:55         | 99,881%        | 28,13 €           | 3:00:00          | 99,966%        | 26,88 €         |
| 31           | 7:00:00           | 99,920%        | 4,56 €             | 2:00:00           | 99,977%        | 5,04 €             | 8:37:07          | 99,902%        | 5,80 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 16,00 €         |
| 32           | 103:51:24         | 98,818%        | 1.043,19 €         | 20:38:41          | 99,765%        | 114,81 €           | 12:06:39         | 99,862%        | 146,03 €          | 4:02:32          | 99,954%        | 22,96 €         |
| 33           | 28:27:19          | 99,676%        | 184,34 €           | 34:34:47          | 99,606%        | 222,33 €           | 4:03:30          | 99,954%        | 6,19 €            | 3:00:00          | 99,966%        | 10,62 €         |
| <b>TOTAL</b> | <b>2957:15:00</b> | <b>98,979%</b> | <b>28.586,72 €</b> | <b>2664:09:14</b> | <b>99,081%</b> | <b>17.912,90 €</b> | <b>269:02:30</b> | <b>99,907%</b> | <b>1.553,52 €</b> | <b>140:27:32</b> | <b>99,952%</b> | <b>493,47 €</b> |

## 6.2. GRÁFICOS DE LOS ERRORES

En los siguientes gráficos se representan los diferentes errores estudiados relacionados con las multiplicadoras y cómo afectan a cada uno de los 4 parques, agrupándolos y mostrando el porcentaje que afecta cada error al total. Se representan todos los errores que han provocado una parada de la turbina a consecuencia de la multiplicadora, por lo que se ha dejado de generar energía a causa de dichos fallos.

Se aprecia que en Castilfrío y El Cayo el mayor porcentaje de errores es el del cambio de multiplicadora, ya que suponen muchas horas de parada debido a las roturas de las multiplicadoras. Las reparaciones de multiplicadora es lo segundo que más afectaba en estos dos parques, realizando los cambios de los elementos dañados in situ dentro de la góndola. Los sistemas de lubricación son los siguientes en aumentar las horas de parada, debido a cambios de filtros, prefiltros, caudalímetro y bomba del sistema de lubricación junto a los niveles bajos de aceite detectados por los sensores. En El Cayo las vibraciones producidas por elementos de la multiplicadora en mal estado suponen un porcentaje alto, como se compara con las vibraciones de Castilfrío. En Castilfrío sin embargo, en el 2016 se realizaron auditorías para comprobar el estado de las multiplicadoras y sus rendimientos, para encontrar posibles fallos y poder subsanarlos, además de tener los informes con los resultados de estas auditorías. Los porcentajes de paradas por endoscopias, temperaturas demasiado altas y dientes rotos en la multiplicadora son errores que no aparecen demasiado, pero son consecuencia del colmataje de filtros por partículas y erosión entre los elementos, provocan vibraciones y hacen que el funcionamiento no sea el adecuado, por eso estos errores son consecuencia de otros con mayor porcentaje.

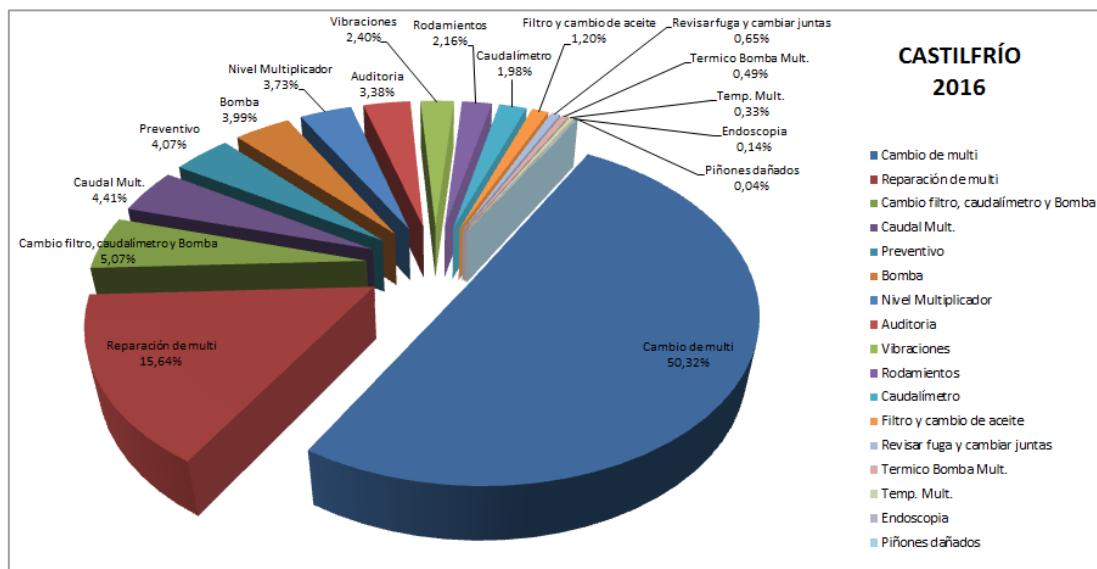


Gráfico 1: Errores Castilfrío 2016.

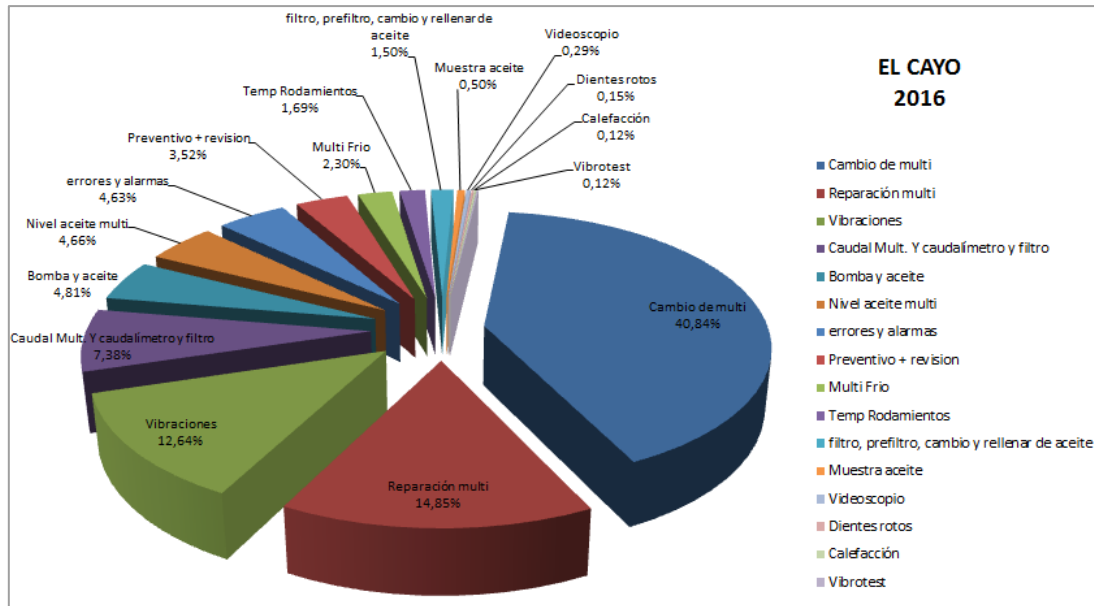


Gráfico 2: Errores El Cayo 2016.

Los parques de Oncala y Magaña al tener otra tecnología de paso fijo, no se tienen tantos errores de multiplicadoras ya que los sistemas de la turbina sufren menos. En comparación con Castilfrío y El Cayo se aprecia que no se han realizado cambios de multiplicadoras, y que se tiene menos cantidad de horas de errores, por lo que la disponibilidad sale mucho mayor. En estos parques las paradas para revisiones y realización de preventivos a las multiplicadoras suponen el mayor porcentaje de paradas. Las paradas relacionadas con el sistema de lubricación, como la bomba, nivel bajo de aceite y temperaturas, filtros y prefiltros tienen otro porcentaje alto en el total de los errores. La toma de muestra de aceite para analizar y ver que siguen sus cualidades óptimas para el alargamiento de la vida útil de la multiplicadora tiene una pequeña parte de importancia en el porcentaje total de los errores, pero en verdad es una tarea muy importante ya que se comprueba que el aceite está en perfectas condiciones y hace que el resto de elementos funcionen a pleno rendimiento, alargando la vida útil de la multiplicadora.

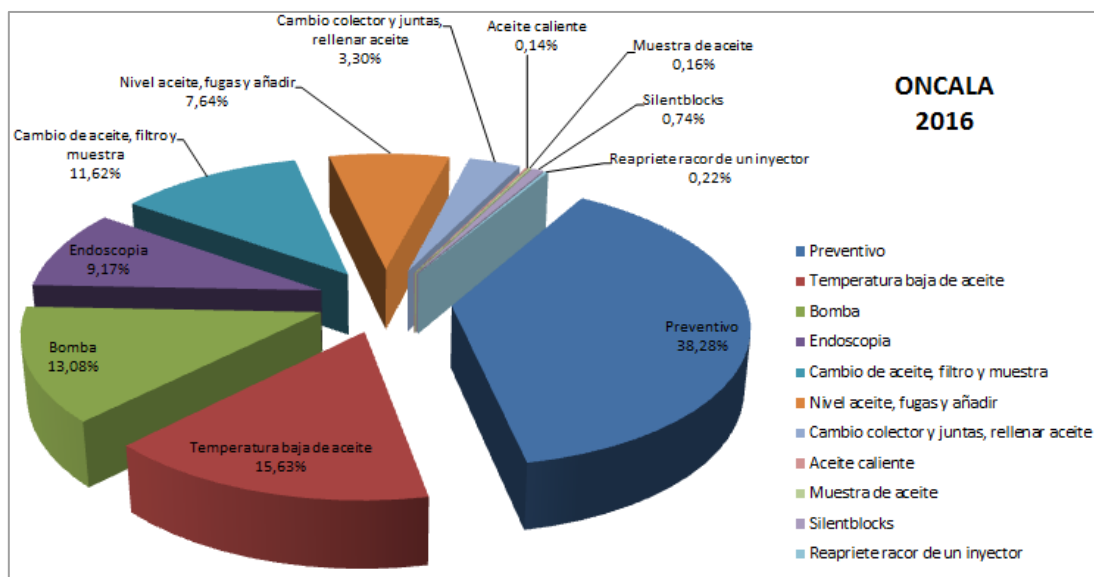


Gráfico 3: Errores Oncala 2016.



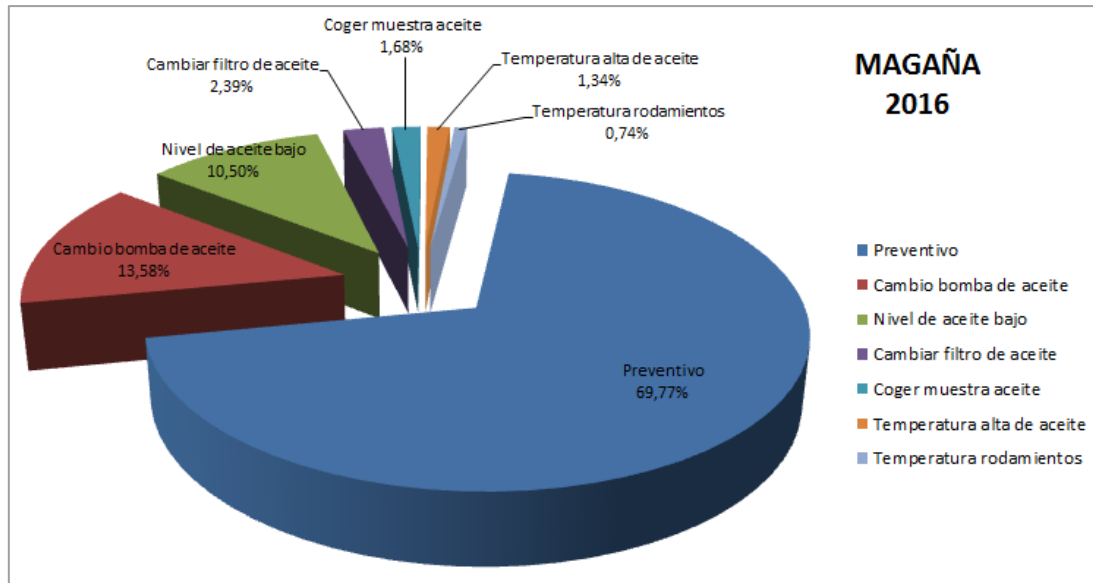


Gráfico 4: Errores Magaña 2016.

En conclusión se aprecia la diferencia de errores que existen entre los parques de Castilfrío y El Cayo y los parques de Oncala y Magaña. Esta diferencia tiene que ver, como se ha explicado anteriormente, por las diferentes tecnologías de cada parque:

- Tecnología de paso variable de Castilfrío y El Cayo (Made AE52 800 kW).
- Tecnología de paso fijo de los parques de Oncala y Magaña (NegMicon NM48/750 y NM52/900).

Destacar que a pesar de la diferencia de horas por paradas entre los parques, la tecnología de paso variable tiene mayores rendimientos y producciones que la de paso fijo, por lo que a pesar de tener más errores y fallos, producen más energía y mayores beneficios los parques de Castilfrío y El Cayo que los parques de Oncala y Magaña, siendo el año 2016 un año fuera de lo común con bastantes percances y roturas de multiplicadoras.



## 7. DISPONIBILIDAD DE STOCK Y REPUESTOS EN ALMACÉN

Como se ha visto en los resultados del año 2016 en los parques, el problema que supone la rotura y cambio de multiplicadora en la falta de producción y de facturación de cada aerogenerador hace que se plantee la cuestión de revisar si merece la pena o no tener multiplicadoras nuevas disponibles en stock en los almacenes de la empresa y así evitar tener parada una turbina durante el periodo de reparación de la multiplicadora dañada.

Cuando una multiplicadora se termina de romper, los equipos de grandes correctivos tardan aproximadamente unas 48 horas en realizar el cambio de la multiplicadora rota por la multiplicadora nueva. Esta maniobra debe realizarse en días de escasez de viento, con un máximo de 10 m/s debido a la complejidad de la maniobra y al peligro que los equipos que la van a realizar se exponen, ya que en los parques de Castilfrío y El Cayo hay que bajar la capota, el rotor y las 3 palas a tierra, para poder desmontar posteriormente la multiplicadora y realizar el cambio, mientras que en los parques de Oncala y Magaña se desmonta solamente la capota. Estas maniobras están explicadas con detalle en el *Anexo 2*. Para ello hacen falta dos grúas de gran tamaño, que con vientos superiores a 10 m/s no pueden trabajar, debido a los grandes pesos que tienen que soportar de las diferentes partes de la turbina. Debido a que la maniobra de cambio de multiplicadora debe hacerse en días con vientos bajos, no se producen grandes pérdidas por dejar de producir energía, sin embargo, el problema está cuando la multiplicadora se rompe en días con altos vientos, donde la turbina está al máximo de producción, por lo que las pérdidas económicas sí que aumentan por multiplicadora, teniendo que esperar vientos bajos para poder aprovechar y realizar la maniobra de cambio.

Además, hay que tener en cuenta que el tiempo que se tarda en reparar una multiplicadora depende de la avería si es de mayor o menor magnitud, pero como para poder solucionar cualquier desperfecto hay que desmontarla y comprobar todos los elementos para verificar que están en buen estado, cambiar y reparar los dañados, el tiempo necesario son 10 semanas desde que se manda la multiplicadora a reparar hasta que vuelve al propietario. Debido a que es mucho tiempo sin que la turbina esté generando, las pérdidas pueden ser de gran magnitud, por lo que otro objetivo del estudio realizado es el cálculo de si merece la pena o no tener stock de multiplicadoras en el almacén, para poder realizar la maniobra de cambio en cuanto se rompa la que está en uso.

El precio de una multiplicadora varía de los 60.000 € que cuestan las multiplicadoras que se usan en los parques de Oncala y de Magaña a los 140.000 € de las usadas en Castilfrío y El Cayo. En las naves de San Pedro Manrique CETASA tiene 2 multiplicadoras de cada tecnología de repuesto listas para poder usarse en caso de que cualquiera de las que están en funcionamiento se averíen que proceden del periodo 2006-2012 cuando el plazo de suministro de una avería importante de multiplicadora era 12 meses.

El precio de reparación de una multiplicadora varía según la gravedad de esta y el estado de sus componentes, pero el precio medio que se valora es el de 40.000 € por reparación. La tarea de reparación se encarga una empresa especialista en este tipo de reparaciones, dejando la multiplicadora en perfecto estado para poder usarse en cuanto otra del parque de fallos y necesite cambiarse.

Con los datos de las producciones medias de los años del 2010 al 2016, los precios medios de la energía y los datos de las multiplicadoras averiadas, podemos calcular la falta de generación y facturación en el periodo de tiempo que estaría parada la turbina mientras la multiplicadora se encuentra en proceso de reparación, las 10 semanas indicadas. En caso de disponer de stock de multiplicadora en el almacén, la maniobra del cambio de multiplicadora se haría en 48 horas desde que se da la orden de cambio, por lo que en el periodo de tiempo de reparación se estaría generando sin tener pérdidas económicas por falta de generación.

Tabla 6: Precio medio de energía y producciones medias de los años 2010-2016.

| AÑOS | ENERGÍA (€/MWh) | PRODUCCIONES (kwh) |         |        |        |        |
|------|-----------------|--------------------|---------|--------|--------|--------|
|      |                 | Castilfrío         | El Cayo | Oncala | Magaña |        |
| 2010 | 82              | 219,86             | 210,56  | 201,87 | 235,72 |        |
| 2011 | 82              | 212,49             | 204,28  | 176,23 | 195,23 |        |
| 2012 | 82              | 258,45             | 252,49  | 218,03 | 242,02 |        |
| 2013 | 82              | 273,37             | 223,41  | 205,55 | 228,64 |        |
| 2014 | Enero           | 82                 | 360,12  | 361,73 | 373,48 | 446,33 |
|      | Febrero         | 82                 | 324,37  | 296,55 | 342,7  | 399,73 |
|      | Marzo           | 82                 | 331,54  | 311,6  | 280,94 | 310,45 |
|      | Abril           | 82                 | 176,49  | 164,07 | 143,19 | 166,04 |
|      | Mayo            | 82                 | 279,74  | 274,87 | 230,08 | 261,48 |
|      | Junio           | 50,95              | 241,07  | 241,23 | 188,46 | 192,05 |
|      | Julio           | 48,21              | 222,63  | 193,64 | 161,6  | 173,29 |
|      | Agosto          | 49,91              | 125,41  | 103,81 | 99,47  | 96,85  |
|      | Septiembre      | 58,89              | 125,02  | 127,08 | 103,78 | 110,45 |
|      | Octubre         | 55,12              | 240,03  | 300,74 | 214,01 | 228,19 |
|      | Noviembre       | 46,8               | 364,74  | 347,34 | 320,77 | 335,97 |
|      | Diciembre       | 47,47              | 378,78  | 363,89 | 331,96 | 381,07 |
| 2015 | Enero           | 51,6               | 370,59  | 357,78 | 309,41 | 346,21 |
|      | Febrero         | 42,57              | 257,11  | 322,61 | 304,82 | 360,24 |
|      | Marzo           | 43,07              | 295,84  | 274,93 | 266,04 | 288,82 |
|      | Abril           | 45,34              | 229,09  | 220,44 | 184,59 | 195,73 |
|      | Mayo            | 45,12              | 360,12  | 369,7  | 300,37 | 328,62 |
|      | Junio           | 53,95              | 155,54  | 153,54 | 112,59 | 108,81 |
|      | Julio           | 59,55              | 149,15  | 151,66 | 114,82 | 119,12 |
|      | Agosto          | 55,59              | 168,03  | 182,09 | 142,31 | 156,34 |
|      | Septiembre      | 51,88              | 160,92  | 141,88 | 173,73 | 136,66 |
|      | Octubre         | 49,91              | 279,6   | 280,44 | 246,14 | 250,8  |
|      | Noviembre       | 51,2               | 222,97  | 225,47 | 194,77 | 229,55 |
|      | Diciembre       | 52,61              | 293,74  | 262,98 | 251,13 | 237,14 |
| 2016 | Enero           | 36,53              | 295,29  | 247,9  | 301,02 | 325,71 |
|      | Febrero         | 27,5               | 314,07  | 267,02 | 314,45 | 335,87 |
|      | Marzo           | 27,79              | 345,05  | 323,57 | 313,08 | 327,89 |
|      | Abril           | 24,11              | 276,02  | 283,5  | 257,52 | 273,73 |
|      | Mayo            | 25,77              | 206,88  | 225    | 166,88 | 189,83 |
|      | Junio           | 38,9               | 161,16  | 137,18 | 113,07 | 137,2  |
|      | Julio           | 40,53              | 105,68  | 84,81  | 68,97  | 73,5   |
|      | Agosto          | 41,16              | 184,86  | 149,38 | 124,37 | 138,43 |
|      | Septiembre      | 43,59              | 170,39  | 167,83 | 142,14 | 160,83 |
|      | Octubre         | 52,83              | 302,61  | 143,79 | 112,27 | 124,08 |
|      | Noviembre       | 56,13              | 278,82  | 275,59 | 221,44 | 271,05 |
|      | Diciembre       | 60,49              | 192,7   | 190,54 | 157,65 | 158,64 |

Para realizar este cálculo se aporta la siguiente tabla de las multiplicadoras cambiadas entre los años 2010 y 2016.

Tabla 7: Multiplicadoras cambiadas entre los años 2010 al 2016.

|            | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | TOTAL |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| ONCALA     | 3    | 1    | 2    | 8    | 5    | 0    | 0    | 19    |
| MAGAÑA     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     |
| CASTILFRÍO | 3    | 4    | 2    | 3    | 6    | 3    | 4    | 25    |
| EL CAYO    | 4    | 2    | 5    | 1    | 2    | 2    | 3    | 19    |

Sabiendo las fechas de cambio de las anteriores multiplicadoras se realizan los cálculos para obtener las pérdidas totales que supondría la no generación en los periodos de reparación de dichas multiplicadoras siguiendo la siguiente operación:

$$\text{Pérdidas} = \text{Nº horas} \cdot \text{Precio energía} \cdot \text{Producción máquina} \cdot \text{Nº multiplicadoras} \quad (6)$$

Una vez realizados los cálculos de los cuatro parques obtenemos una suma total de 1.754.505 € que supondrían las pérdidas económicas totales de los periodos de parada por la falta de facturación derivada de la reparación de multiplicadoras para los 100 MW de los parques entre 2010 y 2016 sin contar con stock. En comparación a este dato se tiene en cuenta las 4 multiplicadoras que se tienen en stock en el almacén, con un coste de 280.000 € las multiplicadoras de los parques con tecnología variable de Made AE-52 y 120.000 € las multiplicadoras de NegMicon haciendo un total de 400.000 € de inversión.

$$\text{Pérdidas anuales sin stock} = \frac{1.754.505 \text{ €}}{6 \text{ años}} = 292.417,5 \text{ €/año}$$

$$\text{Coste anual por stock} = \frac{400.000 \text{ € inversión}}{15 \text{ años vida útil}} + 4\% \cdot 400.000 = 42.666,67 \text{ €/año}$$

$$\text{Ahorro} = 292.417,5 - 42.666,67 = \mathbf{249.750,83 \text{ €/año}}$$

A todo este ahorro generado por tener stock disponible para realizar el reemplazo de una multiplicadora averiada por otra nueva hay que sumarle el valor residual de estas multiplicadoras de stock, que una vez acabada la vida útil del parque siguen estando en buen estado gracias a las reparaciones realizadas, por lo que se puede recuperar parte de la inversión al venderlas a otras empresas o talleres.

Después de analizar estos datos se llega a la conclusión que sí que es rentable la disponibilidad en los almacenes de multiplicadoras para la sustitución en cuanto las condiciones lo permitan, ahorrando muchas pérdidas económicas por indisponibilidad en la reparación de la multiplicadora averiada.



## 8. CONCLUSIONES

A lo largo de la realización de este estudio y análisis de los datos proporcionados por la empresa CETASA, en la cual se realizaron la mayoría de las labores que se muestran, se obtiene un análisis de datos en relación a la multiplicadora de cada una de las 132 máquinas que componen el parque. Gracias a este análisis estadístico de los errores y paradas de los aerogeneradores que se han producido a lo largo del año 2016 por causas relacionadas con la multiplicadora, se obtienen los errores más comunes y que con más frecuencia aparecen para poder trabajar sobre ellos, teniéndolos más en cuenta para actuar con labores de mantenimiento y control de las turbinas y la revisión ocasional de estos elementos cada vez que se realice cualquier otra operación en la máquina, consiguiendo de esta manera un control más riguroso de los elementos que suelen crear con mayor frecuencia paradas de la multiplicadora y del aerogenerador dejando de generar energía. También gracias a este análisis de datos se estudia la posibilidad de disponer de stock o no de repuestos de multiplicadoras en los almacenes.

Como se explica y se muestra en el apartado “6.2. Gráficos de los errores”, los parques de Oncala y Magaña tienen el mayor porcentaje de parada en la revisión y realización de preventivos, seguidos de todos aquellos errores relacionados con la lubricación, como son la bomba, temperaturas de aceite, su nivel bajo y los filtros y prefiltros. Con estos datos y la frecuencia con la que aparece se llega a la conclusión que estos dos parques no tienen apenas paradas del aerogenerador por causas relacionadas con la multiplicadora, teniendo una disponibilidad del 99.907 % y 99.952 % respectivamente, siendo valores muy buenos. Se sabe que las máquinas de paso fijo tienen una vida útil de multiplicadoras mayor que en otro tipo de tecnologías.

Los parques de Castilfrío y El Cayo funcionan diferente a los anteriores, debido a la tecnología de paso variable, teniendo mayor tiempo de paradas por causas relacionadas con la multiplicadora, aunque mantienen buenos datos de disponibilidad con un 98.979 % y 99.081 % respectivamente. El mayor porcentaje del tiempo de parada en esta tecnología de paso variable es debido a cambios de las multiplicadoras ya que cada cambio supone muchas horas de parada, siendo la causa que más afecta a las paradas de las turbinas de gran potencia. Las reparaciones de estas es lo segundo que más afecta. Los errores asociados a los sistemas de lubricación también afectan a la disponibilidad de la multiplicadora por su frecuencia de aparición, por lo que al igual que en los parques de Oncala y Magaña estas labores de mantenimiento, prevención y cambio de elementos es importante que se realicen, para optimizar el funcionamiento de la multiplicadora y evitar daños mayores y más costosos. La realización de auditorías en el parque de Castilfrío asegura el estado de las máquinas, actuándose sobre los elementos dañados para alargar la vida útil y mejorar su rendimiento.

Con la realización del estudio de las pérdidas económicas mediante el cálculo de las producciones y el precio de la energía en la duración de los errores se observa que las condiciones meteorológicas tienen gran importancia en la reparación del error, sobre todo los grandes correctivos como el cambio de multiplicadora, ya que con rangos de viento superiores a 10 m/s no se permiten realizar estas labores, por lo que en épocas de vientos altos el aerogenerador se puede quedar parado durante un largo periodo de tiempo. La prevención de

errores, aprovechando diferentes mantenimientos para la revisión superficial y visual de los elementos anteriormente comentados es de gran importancia ya que gracias al estudio de estos errores se puede crear un calendario de tareas aprovechando días de poca producción con vientos nulos o en días en que el mercado de energía se encuentre con precios bajos para realizar estas tareas y así prevenir posteriores errores.

Todo esto va relacionado con la disponibilidad o no de stock en las naves de la empresa. Según se ha analizado en el apartado “7. Disponibilidad de stock y repuestos en almacén” y con los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que si es rentable la disponibilidad en los almacenes de multiplicadoras para la sustitución en el momento que se rompan las multiplicadoras en funcionamiento, sabiendo que esta maniobra depende de las condiciones climatológicas de viento. De esta manera se evitarán las pérdidas por falta de producción durante el tiempo en el que la multiplicadora se manda a reparar, ya que puede ser sustituida inmediatamente por las multiplicadoras que se tienen en el almacén. Con el análisis de datos realizado de todos los errores y su frecuencia de aparición y duración se observa que con disponer en los almacenes de dos multiplicadoras de cada tipo de tecnología, paso fijo y paso variable, es suficiente para realizar los cambios necesarios en todo el periodo de tiempo estudiado.



## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Abdollahzadeh, H., Atashgar, K., & Abbasi, M. (2016). Multi-objective opportunistic maintenance optimization of a wind farm considering limited number of maintenance groups. *Renewable Energy*, 247-261.
- CETASA. (27 de Diciembre de 2001). Contrato Privado O&M CETASA. Soria.
- Dai, J., Yang, W., Cao, J., Liu, D., & Long, X. (2018). Ageing assessment of a wind turbine over time by interpreting wind farm SCADA data. *Renewable Energy*, 199-208.
- Dao, P., Staszewski, W., Barszcz, T., & Uhl, T. (2018). Condition monitoring and fault detection in wind turbines based on cointegration analysis of SCADA data. *Renewable Energy*, 107-122.
- Emerson Process Management*. (s.f.). Recuperado el 28 de Diciembre de 2017, de [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/BusSch-OEE\\_102es.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/BusSch-OEE_102es.pdf)
- Fernandes, C., Blazquez, L., Sanesteban, J., Martins, R., & Seabra, J. (2016). Energy efficiency test in a full scale wind turbine gearbox. *Tribology International*, 101, 375-382.
- Fernandes, C., Marques, P., Martins, R., & Seabra, J. (2015). Gearbox power loss.Part II: friction losses in gears. *Tribology International*, 309-316.
- Florea, G., Paraschiv, A., & Cimpoescu, E. (2012). Wind Farm Noise Monitoring Used for Predictive Maintenance. *Proceedings Volumes*, 1822-1827.
- Fried, L. (14 de Febrero de 2018). *Global Wind Statistics 2017*. Recuperado el 4 de Marzo de 2018, de GWEC Global Wind Energy Council: [http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC\\_PRstats2017\\_EN-003\\_FINAL.pdf](http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf)
- Gong, Y., Fei, J.-L., Tang, J., Yang, Z.-G., Han, Y.-M., & Li, X. (2017). Failure analysis on abnormal wear of roller bearings in gearbox for wind turbine. *Engineering Failure Analysis*, 26-38.
- Hur, S., & Leithead, W. (2016). Collective control strategy for a cluster of stall-regulated offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 1260-1270.
- La eólica en España*. (2018). Recuperado el 4 de Marzo de 2018, de AEE Asociación Empresarial Eólica: <https://www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>
- Liang, X., Zuo, M., & Feng, Z. (2018). Dynamic modeling of gearbox faults: A review. *Mechanical Systems And Signal Processing*, 852-876.
- Marques, P., Fernandes, C., Martins, R., & Seabra, J. (2014). Efficiency of a gearbox lubricated with turbine gear oils. *Tribology International*, 71, 7-16.
- Marvuglia, A., & Messineo, A. (2012). Monitoring of wind farms power curves using machine learning techniques. *Applied Energy*, 574-583.

- Mustafa, T., Yildiz, M., & Özkan, A. (2018). Investigation and refinement of gearbox whine noise. *Applier Acoustics*, 305-311.
- Nie, M., & Wang, L. (2013). Review of condition monitorin and fault diagnosis technologies for wind turbine gearbox. *Procedia CIRP*, 287-290.
- OMIE. (s.f.). Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, de OMIE: <http://www.omie.es/inicio>
- Pires Leite, G., Maurício Araújo, A., & Carvalho Rosas, P. (2018). Prognostic techniques applied to maintenance of wind turbines: a concise and specific review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1917-1925.
- Red Electrica de España. (15 de Enero de 2018). Recuperado el 4 de Marzo de 2018, de <http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/series-estadisticas/series-estadisticas-nacionales>
- Sarker, B., & Ibn Faiz, T. (2016). Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy. *Renewable Energy*, 104-113.
- Shanbr, S., Elasha, F., Elforjani, M., & Teixeira, J. (2018). Detection of natural crack in wind turbine gearbox. *Renewable Energy*, 172-179.
- Sotavento Galicia. (s.f.). Recuperado el 8 de Marzo de 2018, de Características de las maquinas: <http://www.sotaventogalicia.com/es/area-tecnica/instalaciones-eolicas/caracteristicas-maquinas>
- Sun, P., Li, J., Wang, C., & Lei, X. (2016). A generalized model for wind turbine anomaly identification based on SCADA data. *Applied Energy*, 550-567.
- The Wind Power. (27 de Diciembre de 2016). Recuperado el 2 de Marzo de 2018, de The Wind Power Neg Micon NM48-750: [https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_186\\_neg-micon\\_nm48-750.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_186_neg-micon_nm48-750.php)
- The Wind Power. (27 de Diciembre de 2016). Recuperado el 2 de Marzo de 2018, de The Wind Power Neg Micon NM52-900: [https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_185\\_neg-micon\\_nm52-900.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_185_neg-micon_nm52-900.php)
- The Wind Power. (3 de Julio de 2017). Recuperado el 2 de Marzo de 2018, de The Wind Power Made AE-52: [https://www.thewindpower.net/turbine\\_es\\_50\\_made\\_ae-52.php](https://www.thewindpower.net/turbine_es_50_made_ae-52.php)
- Yildirim, M., Gebraeel, N., & Andy Sun, X. (2017). Integrated predictive analytics and optimization for opportunistic maintenance and operations in wind farms. *IEEE Transactions on power systems*, 4319-4328.
- Zhao, M., & Ji, J. (2015). Nonlinear torsional vibrations of a win turbine gearbox. *Applied Mathematical Modelling*, 4928-4950.
- Zhu, C., Xu, X., Liu, H., Luo, T., & Zhai, H. (2014). Research on dynamical characteristics of wind turbine gearboxes with flexible pins. *Renewable Energy*, 724-732.

## ANEXO I: ERRORES Y ALARMAS

### MAGAÑA (NM52/900 kW)

A lo largo del anexo se van a mostrar varios listados de las alarmas que aparecen en el sistema cuando la multiplicadora tiene cualquier alarma o error al igual que su explicación, la causa principal de estos errores y el remedio y actuación a seguir para repararlos.

Tabla 1: Lista de alarmas, funciones de parada y reseteo de Magaña. Fuente: Manual de O&M CETASA parque de Magaña. (Elaboración propia).

| Nº ALARMA | NOMBRE DE LA ALARMA         | EXPLICACIÓN DE LA ALARMA                                                                                                                      | ALARMA SET POINT |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 112       | Gear oil temp. high         | La temperatura del aceite de la multiplicadora es mayor que el límite máximo.                                                                 | 75 °C            |
| 113       | Ger oil temp. low           | La temperatura del aceite de la multiplicadora es menor que el límite mínimo.                                                                 | -10 °C           |
| 114       | Gear bear. Front temp. high | La temperatura delantera del rodamiento es mayor que el límite máximo.                                                                        | 105 °C           |
| 115       | Gear bear. Front temp. low  | La temperatura delantera del rodamiento es menor que el límite mínimo.                                                                        | -20 °C           |
| 116       | Gear bear. rear temp. high  | La temperatura trasera del rodamiento es mayor que el límite máximo.                                                                          | 105 °C           |
| 117       | Gear bear. Rear temp. low   | La temperatura trasera del rodamiento es menor que el límite mínimo.                                                                          | -20 °C           |
| 250       | Gearbox ratio fault         | La velocidad del eje rápido del generador no se corresponde con la velocidad del eje lento del rotor.                                         | 0.5              |
| 305       | Gear oil pump overload      | El disyuntor de la bomba de aceite se ha disparado.                                                                                           | -                |
| 362       | Gearbox oil low             | Nivel de aceite bajo                                                                                                                          | -                |
| 388       | Gearoil filter clogged      | El sensor del filtro del enfriador capta que está obstruido mientras que el aceite refrigerado funciona a una temperatura mayor al parámetro. | 45 °C            |
| 601       | Manual stop keyboard        | Se ha pulsado el botón de parada del teclado TAC.                                                                                             | -                |
| 604       | Remote stop                 | La turbina ha sido parada por un comando de parada remota.                                                                                    | -                |
| 621       | Service key                 | La llave de mantenimiento del panel principal está activada.                                                                                  | -                |
| 998       | Max stop time               | La turbina ha estado con fallo durante mucho tiempo (advertencia).                                                                            | -                |

El “-” significa ausencia de dato.

La llave de mantenimiento funciona como un bloqueo. Colocándola en posición "1" previene la operación remota del aerogenerador vía módem o mediante un sistema de monitorización del parque. El sistema de control registra la activación de la llave de mantenimiento. Mientras se lleva a cabo un mantenimiento o una comprobación de los sistemas de seguridad, no quedan registrados los errores que se puedan producir. Una vez se ha finalizado el mantenimiento, la llave se debe devolver a la posición "0".

Tabla 2: Tabla indicativa de varios problemas relacionados con la multiplicadora junto a sus causas y remedio. Fuente: Manual de O&M CETASA parque de Magaña. (Elaboración propia).

| PROBLEMA                                                             | CASUSAS                                                   | REMEDIO                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cambio en los sonidos de la multiplicadora durante el funcionamiento | Daños en los dientes                                      | Contacte con el departamento de mantenimiento de NEG Micon y comuníquese con los expertos del suministrador de la unidad. Revise los engranajes; si es necesario sustituya los componentes dañados.       |
|                                                                      | Juego excesivo en los rodamientos                         | Contacte con el departamento de mantenimiento de NEG Micon y comuníquese con los expertos del suministrador de la unidad. Ajuste el juego.                                                                |
|                                                                      | Rodamientos defectuosos                                   | Contacte con el departamento de mantenimiento de NEG Micon y comuníquese con los expertos del suministrador de la unidad. Sustituya los rodamientos defectuosos.                                          |
| Incremento de temperatura en los rodamientos                         | Nivel de aceite demasiado bajo                            | Revise el nivel de aceite; añada más en caso necesario. Revise posibles fugas y repararlas.                                                                                                               |
|                                                                      | Aceite gastado                                            | Compruebe la última fecha de cambio de aceite. Cámbielo si es necesario.                                                                                                                                  |
|                                                                      | Bomba del aceite estropeada                               | Revise la bomba. Cámbiela si es necesario.                                                                                                                                                                |
|                                                                      | Rodamiento(s) defectuoso                                  | Contacte con el departamento de mantenimiento de NEG Micon y comuníquese con los expertos del suministrador de la unidad. Revise los rodamientos y sustitúyalos si es necesario.                          |
|                                                                      | Limpiador de aceite en la multiplicadora torcido          | Recolocación del limpiador (se aconseja un espacio de 0,5 mm).                                                                                                                                            |
|                                                                      | Impurezas en el aceite de los rodamientos o en cavidades  | Retire las impurezas acumuladas y limpie las zonas afectadas. Cambie el filtro del aceite.                                                                                                                |
| Temperatura de funcionamiento excesiva                               | El nivel de aceite en la unidad es demasiado elevado/bajo | Compruebe el nivel de aceite a temperatura ambiente, añada o quite aceite según se requiera.                                                                                                              |
|                                                                      | El aceite está gastado                                    | Compruebe la última fecha de cambio de aceite. Cámbielo si es necesario.                                                                                                                                  |
|                                                                      | El aceite está muy sucio                                  | Cambie el filtro del aceite.                                                                                                                                                                              |
|                                                                      | Multiplicadoras con sistema de refrigeración del aceite   | Revise la bomba.                                                                                                                                                                                          |
|                                                                      | Multiplicadoras con refrigeración por aire                | Revise el ventilador.                                                                                                                                                                                     |
|                                                                      | El caudal de aceite en el refrigerador es muy bajo        | Cambie el filtro del aceite.                                                                                                                                                                              |
|                                                                      | Bomba del aceite defectuosa                               | Compruebe el funcionamiento de la bomba, si es necesario repárela o sustitúyala.                                                                                                                          |
|                                                                      | Multiplicadoras con ventilador o muy sucias               | Limpie la cubierta del ventilador y la multiplicadora.                                                                                                                                                    |
| Fuertes ruidos en la bancada de la multiplicadora                    | La multiplicadora se ha soltado de la bancada             | Apriete pernos y tuercas con el par indicado. Sustituya los pernos o tuercas dañados. Haga un informe de desviación.                                                                                      |
| Escape de aceite en la multiplicadora                                | Sellado inadecuados de las juntas o de la cubierta        | Revise las juntas y retenes. Sustituya las necesarias. Selle las juntas.                                                                                                                                  |
|                                                                      | Juntas laberínticas sucias o con fugas                    | Revise la junta y limpie el aceite. Revise el nivel de aceite. Compruebe si hay demasiada espuma.                                                                                                         |
| El sensor de presión dispara la alarma (si hay intercambiador)       | La presión del aceite es menor de 0,5 bar                 | Revise el nivel de aceite a temperatura ambiente, añada o quite aceite si es necesario. Revise la bomba del aceite; sustitúyala si se requiere. Revise el filtro del aceite y sustitúyalo si se requiere. |

## ONCALA (NM48/750 kW)

A continuación se muestra la tabla del listado de errores que se registran en el parque de Oncala. Estos son los errores que se han analizado y estudiado en todo el trabajo, explicados y desarrollados en el apartado “5. Metodología y análisis de datos”.

Tabla 3: Lista de alarmas, funciones de parada y reseteo de Oncala. Fuente: Manual de O&M CETASA parque de Oncala. (Elaboración propia).

| Nº ALARMA | NOMBRE DE LA ALARMA     | EXPLICACIÓN DE LA ALARMA                                                              | ALARMA SET POINT |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 17        | Gear oil hot            | La temperatura del aceite de la multiplicadora ha excedido el límite máximo.          | 75 °C            |
| 47        | Stop via dataline       | El WTG ha recibido un inicio vía dataline.                                            | -                |
| 69        | Manual stop keyboard    | Se ha activado la parada manual del teclado.                                          | -                |
| 81        | Service                 | La llave de mantenimiento ha sido activada.                                           | -                |
| 83        | Gear oil temp. too low  | La temperatura del aceite de la multiplicadora es menor que el límite mínimo.         | -10 °C           |
| 84        | Overload gear oil pump  | La protección de la bomba de aceite ha sido activada.                                 | 0                |
| 86        | Gear bearing hot        | La temperatura en el rodamiento ha excedido el límite máximo.                         | 105 °C           |
| 91        | Vibration guard         | El protector por vibraciones ha sido activado.                                        | -                |
| 118       | Max stop time           | La turbina ha estado con fallo durante mucho tiempo (advertencia).                    | -                |
| 119       | Gear oil hot-short time | La temperatura del aceite ha sido mayor que el límite por un corto periodo de tiempo. | 80 °C            |
| 120       | Dirty oil filter        | El filtro de aceite de la multiplicadora está sucio.                                  | 55 °C            |

El “-” significa ausencia de dato.

## CASTILFRÍO Y EL CAYO (Made AE52 800 kW).

Tabla 4: Lista de alarmas, funciones de parada y reseteo de Castilfrío y El Cayo. Fuente: Manual de O&M CETASA parques de Castilfrío y El cayo. (Elaboración propia).

| Nº ALARMA | NOMBRE DE LA ALARMA           | EXPLICACIÓN DE LA ALARMA                                                                                                                                                        |
|-----------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1400      | Llave de Mantenimiento Activa | -                                                                                                                                                                               |
| 1500      | AUDITORIA                     | -                                                                                                                                                                               |
| 2001      | Arranque                      | Registro de la fecha y hora en que vuelve la alimentación al PLC.                                                                                                               |
| 2046      | Temp. Rod. Mult.              | -                                                                                                                                                                               |
| 2048      | Multiplicador Frio            | -                                                                                                                                                                               |
| 2052      | Nivel Multiplicador           | El nivel de aceite se encuentra bajo.                                                                                                                                           |
| 2053      | Térmico Bomba Mult.           | Se produce cuando salta el térmico de la bomba o del intercambiador de aceite del multiplicador. Este error esta filtrado 200 ms.                                               |
| 2055      | Caudal Mult.                  | -                                                                                                                                                                               |
| 2056      | Temp. Mult.                   | La temperatura del aceite está por encima del límite máximo.                                                                                                                    |
| 2076      | Exc. Vibrac. VIB              | -                                                                                                                                                                               |
| 2090      | Vibraciones VIB               | Se produce cuando actúa el sensor de vibraciones externo de forma instantánea. También cuando el sensor de vibraciones pendular actúa durante 2s o dos veces en menos de 3 min. |
| 2095      | SETA Emergencia               | Parada de emergencia.                                                                                                                                                           |
| 2116      | Ree. Bomba Mult               | -                                                                                                                                                                               |
| 2125      | Ree. Inter. Mult              | -                                                                                                                                                                               |

El “-” significa ausencia de dato.

El control durante su funcionamiento va a detectar una serie de anomalías que en caso de producirse afectarán al aerogenerador de diferentes formas. El control permite cambiar la acción para cada tipo de error según las siguientes:

- Stop (Stp): Parar la máquina. Son alarmas importantes que necesitan una inspección de la máquina y posteriormente un rearme manual.
- Rearme (Rst): Parar la máquina, pero el rearme se hace automáticamente una vez que el error haya desaparecido.
- Alarma (Ala): No paran la máquina, únicamente informan de una determinada situación.
- Inactivo (Des): Anula la acción del error.

Adicionalmente, al tipo de error, la parada puede ser de dos tipos:

- Normal: Actúa la electroválvula proporcional.
- Emergencia (Emg): Actúa la electroválvula de emergencia con sus distintas modalidades de enclavamiento o no.

Si ya existe un error y se provoca otro, no aparece este último a no ser que al resetear perdure el último error y haya desaparecido el anterior.

## ERRORES RELACIONADOS CON EL MULTIPLICADOR

Térmico de la bomba y del intercambiador del multiplicador. (Stp): Se produce cuando salta el térmico de la bomba o del intercambiador de aceite del multiplicador. Este error esta filtrado 200 ms.

Bajo nivel de aceite del multiplicador. (Stp): Se produce cuando se detecta nivel bajo de aceite del multiplicador durante 10 min.

Falta de flujo de aceite de multiplicador. (Stp): Se produce cuando se detecta falta de flujo de aceite del multiplicador durante más de 5 s., con la bomba de aceite del multiplicador funcionando y más de 100 r.p.m. de generador en todo ese intervalo.

Filtro colmatado de aceite del multiplicador. (Des): se produce cuando se detecta filtro colmatado de aceite del multiplicador estando la temperatura por encima de 40 °C. Este error esta filtrado 200 ms. En ocasiones es visual.

Excesiva temperatura del aceite del multiplicador. (Stp): se produce cuando la temperatura del aceite es superior a 85 °C.

Excesiva temperatura del rodamiento del eje rápido del multiplicador. (Stp): se produce cuando la temperatura del rodamiento es superior a 95 °C. (en los prototipos esta desactivado).

Fallo sensor generador. (Stp): se produce cuando durante 5 s. las revoluciones del generador son superiores a 120 % o inferiores al 80 % del producto entre la relación de multiplicación y las revoluciones del rotor y además el sensor de rotor mide 0 r.p.m. Si se produce fallo en la relación de multiplicación y ningún sensor mide cero entonces por defecto aparecerá fallo sensor rotor.

Fallo sensor rotor. (Stp): se produce cuando durante 15 s las revoluciones del generador son superiores a 120 % o inferiores al 80 % del producto entre la relación de multiplicación y las revoluciones del rotor y además el sensor de rotor mide 0 r.p.m. y el sensor del generador mide más de 300 r.p.m. Si se produce fallo en la relación de multiplicación y ningún sensor mide cero entonces por defecto aparecerá fallo sensor rotor.

### Otros errores a tener en cuenta producidos por la multiplicadora:

Error de vibraciones externo. (Rst): se produce cuando actúa el sensor de vibraciones externo de forma instantánea.

Error de vibraciones. (Stp): se produce cuando el sensor de vibraciones pendular actúa durante 2 s. ó dos veces en menos de 3 min.

Error de excesivas vibraciones externo. (Stp): se produce cuando actúa más de una vez el sensor de vibraciones externo en 2 h y 46 m.





## ANEXO II: GRANDES CORRECTIVOS: CAMBIO DE MULTIPLICADORA

### CAMBIO DE MULTIPLICADORA EN CASTILFRÍO

Toda la información que se muestra a continuación en este anejo trata de maniobras que se realizaron en las máquinas de CETASA debido a roturas de las multiplicadoras en el periodo de tiempo de realización de mis prácticas en la empresa y de realización de este Trabajo Final de Máster.

Los grandes correctivos de cambio de multiplicadora en Castilfrío los realiza una empresa de Galicia, Huso29, junto a Gamesa que es la encargada del mantenimiento de este parque.

Para la realización de estas maniobras son necesarias dos grúas de grandes dimensiones ya que en los aerogeneradores de Made AE-52 es necesario bajar el rotor entero con las 3 palas a suelo. Una vez que entre las dos grúas y con ayuda de cuerdas tiradas por los operarios (para evitar que pegue bandazos el rotor debido al viento) esté en el suelo el rotor se apoya en un soporte especial, mientras que las palas se les colocan poliestireno expandido para que tengan puntos de apoyo y no sufran. Aprovechando que están en el suelo se realiza una inspección visual de las palas y rotor por si se encontrara algún desperfecto y/o desgaste que debiera ser reparado.



*Imágenes 1 y 2: Sujeción de las palas y bajada del rotor con las palas al suelo.*

El equipo que realiza estas maniobras primero tiene que soltar todos los elementos del sistema de lubricación de la multiplicadora, como el radiador, la bomba y todos los latiguillos. También se vacía todo el aceite que contiene la multiplicadora echándolo en los recipientes adecuados para su posterior reciclaje. Esta tarea se suele realizar unas horas antes de empezar la maniobra, normalmente la tarde/noche de antes, para que todos los elementos se encuentren al día siguiente disponibles de realizar la maniobra. Una vez bajado el rotor con las 3 palas, se

suelta la multiplicadora de sus fijaciones en la turbina y se baja a suelo firme junto con el eje que la une al rotor, donde se separan ambos elementos.



*Imágenes 3 y 4: Descenso de la multiplicadora a sustituir junto con el eje lento.*

Para separar el eje lento de la multiplicadora lo primero se debe aflojar todos los tornillos del sistema de encaje cónico que une estos elementos. Es necesaria la ayuda de uno o dos gatos hidráulicos y si fuera necesario de un soplete para calentar la unión entre los elementos al dilatarse y así realizar mejor la separación.



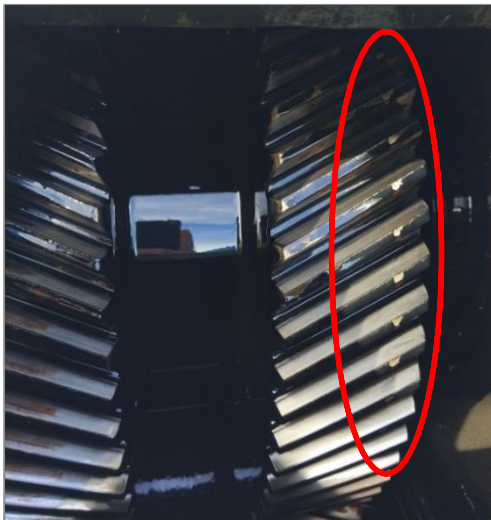
*Imagen 5: Desencaje del eje lento de la multiplicadora mediante gatos hidráulicos.*

El motivo del cambio de esta multiplicadora es que llevaba tiempo soltando mucha viruta y residuos empeorando las propiedades del aceite lubricante y todos los engranajes. Para alargar un poco más su vida útil se optó por cambiar su aceite más a menudo, pero llegó un momento en el que el cambio de multiplicadora era necesario. Como se muestra en la siguiente imagen, se ve el prefiltro lleno de virutas a pesar del último cambio de aceite en el último mes.



*Imágenes 6 y 7: Prefiltro colmatado de viruta.*

Debido a este exceso de viruta y roce entre los dientes de los engranajes, se producen roturas y desperfectos que acaban bajando el rendimiento de la multiplicadora y dando alarmas y errores que hace que se pare. En la siguiente imagen se aprecian unas pequeñas roturas en los engranajes superiores, dejándose ver retirando una tapa superior de la multiplicadora. Las muescas que se aprecian en la imagen son de pequeño tamaño, siendo en los engranajes del eje inferior donde se encontraba la avería más severa.



*Imágenes 8 y 9: Engranajes con mordidas en los dientes debido a las virutas de metal. Multiplicadora con tapa superior abierta por donde se aprecian los engranajes.*

El sistema de frenado, tanto el disco como las pastillas y bomba deben cambiarse de la multiplicadora vieja a la que se va a poner nueva. Una vez hechos todos los cambios de los sistemas de freno, bombas y colocación del eje lento en la multiplicadora nueva, esta se carga con la grúa y se sube a la góndola donde se colocará y se alineará con el generador. Una vez que esta tarea de colocación esté realizada se subirá de nuevo el rotor con las 3 palas y se colocará en su sitio, alineando y engancho el eje lento posteriormente entre rotor y multiplicadora. Una vez esté la multiplicadora en su sitio, se procederá a la colocación de manguitos, bombas y radiador, y al rellenado de aceite nuevo de la multiplicadora.



*Imagen 10: Ascenso de la multiplicadora nueva con el eje lento ya acoplado.*



*Imágenes 11 y 12: Ascenso y colocación del rotor y las palas.*



## CAMBIO DE MULTIPLICADORA EN ONCALA

Los cambios de multiplicadora en las máquinas Neg Micon tienen un proceso diferente de actuación que en las Made. En este caso no se desmonta ni baja el rotor con las palas al suelo, sino que la capota de la turbina se abre y es por donde se va a sacar la multiplicadora. La empresa que se encarga de realizar estas labores de cambio de multiplicadora es Vestas.

Una de las primeras tareas a realizar es la de asegurar que la turbina se encuentre en parada completa de palas y rotor con las debidas setas y medidas de seguridad. También se tiene que subir y colocar el “Fixture” (Imagen 13) junto al eje lento para dejar el rotor fijo y así evitar cualquier movimiento y desplazamiento una vez que se retire la multiplicadora. El “Fixture” Se fija a la estructura de la cabina y se sujeta el eje lento que une el rotor con la multiplicadora, de esta manera la multiplicadora puede desacoplarse del eje y ser sustituida.



Imagen 13 y 14: “Fixture” Sistema de fijación del eje lento del rotor para su sujeción.

Una vez realizada esta operación se procede a la sustitución de una multiplicadora por otra y para ello deben soltarse los sistemas hidráulicos como latiguillos, radiador y bombas. En las siguientes imágenes se muestran los nuevos sistemas por donde circulará el lubricante, y el tipo de lubricante usado para rellenar la multiplicadora.



Imágenes 15 y 16: Radiador y sistemas de latiguillos. Aceite utilizado en la multiplicadora.

Una vez que la multiplicadora se ha desacoplado del eje lento y del generador, se procede a bajarla con la ayuda de una grúa de gran tonelaje. Normalmente el eje sale sin problemas del espacio donde va encajado, pero en ocasiones, en la unión del anillo cónico de la multiplicadora con el eje lento, surgen complicaciones para su separación, como fue el caso de esta máquina. Al proceder a su separación, se creó una pequeña viruta de metal que al ser arrastrada por el eje mientras se procedía a su separación, se iba haciendo más grande por lo que se complica la operación al no dejar que el eje saliera con suavidad.



Imágenes 17 y 18: Anillo cónico de la multiplicadora con arrastre de viruta. Descenso de multiplicadora.

Se rellena la multiplicadora nueva con aceite dando uso a estas las garrafas vacías para rellenarlas con el aceite de la multiplicadora vieja y rota una vez que esté abajo, para guardarlo y posteriormente llevarlo a reciclar. Los sistemas de freno, el disco de freno, la bomba hidráulica de la multiplicadora vieja se desmontan y se colocan en la nueva, siempre que funcionen correctamente. Una vez acondicionada la multiplicadora nueva, se sube a la góndola donde se procederá a colocarla en su sitio, uniéndola y alineándola con el generador y encajándola con el eje lento. Una vez que la tarea esté finalizada, se procederá a quitar el “Fixture” del eje y se comprobará que todo ha quedado en su correcta posición y funcionamiento y se podrá volver a poner en marcha el aerogenerador.



Imagen 19: Ascenso de la multiplicadora nueva.