



**Universidad  
de Holguín**

FACULTAD  
DE INGENIERÍA  
DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

# ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD PARA LA MULTIPLICADORA Y EL GENERADOR DE LOS AEROGENERADORES DEL PARQUE EÓLICO GIBARA 1

TRABAJO DE DIPLOMA

AUTOR: Pablo Alejandro Mastrapa Domínguez

TUTORES: Ing. Raúl Torres Sainz

Ing. Eduardo Escalona Soto

HOLGUÍN, 2021



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutor Raúl Torres Sainz por el tiempo dedicado a enseñarme y por la confianza depositada en mí.

Al profesor Pedro Luis Pérez Font por el tiempo y dedicación brindados en el desarrollo de la investigación.

A mis padres y familiares por el apoyo incondicional durante toda mi formación.

A todos mis compañeros por haberme permitido compartir con ellos mi etapa universitaria.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica porque mi formación como Ingeniero Mecánico se las debo, en gran parte, a ellos.

## **DEDICATORIA**

A mi madre, la mujer que más amo en el mundo, y a mi padre, que a pesar de que, en estos momentos, por asuntos de trabajo, esté a miles de kilómetros de mí, han luchado incansablemente para que alcance mis sueños.

A mi abuela Aya por todos los consejos, apoyo y dedicación que solo una abuela sabe brindar a su nieto.

A todos aquellos que de alguna forma u otra me ayudaron a llegar hasta el final de este trabajo.

A todos, MUCHAS GRACIAS.

## RESUMEN

La presente investigación aborda cómo elaborar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad para la multiplicadora y el generador de los aerogeneradores del Parque Eólico (PE) Gibara 1. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica y fundamentación teórica del problema a estudiar, se caracterizaron los aerogeneradores del PE Gibara 1 y se aplicó la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad o RCM por sus siglas en inglés (*Reliability Centred Maintenance*) a la multiplicadora y generador de los mismos, llegando a las siguientes conclusiones, se desarrolló la metodología RCM para la multiplicadora y el generador de los aerogeneradores del PE Gibara 1, haciendo un estudio detallado de los elementos que componen estos subsistemas. Se realizó un plan de mantenimiento basado en el RCM para estos subsistemas. Se demostró que el lubricante en uso está en condiciones para continuar en servicio, y en cuanto al estado técnico de la máquina se detectaron presencia de partículas de desgaste (hierro) que alertan sobre un posible nivel de deterioro en los engranes y rodamientos de la multiplicadora, que pueden estar provocando las constantes alarmas por altas temperaturas en el equipo.

## ABSTRACT

This research addresses how to develop a maintenance plan based on reliability for the gearbox and the generator of the wind turbines of the Gibara Wind Farm 1. For this, a bibliographic search and theoretical foundation of the problem to be studied were carried out. Wind turbines of Gibara Wind Farm 1 and the methodology of Reliability Centered Maintenance or RCM was applied to their gearbox and generator, reaching the following conclusions, several breaks and unforeseen stops have occurred, which has affected availability and has caused large production losses, and that through the proposed maintenance plan it is possible to anticipate failures and their consequences, and thus improve and increase the availability and effectiveness of the gearbox and generator of Gibara Wind Farm 1 wind turbines.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	12
1.2    Mantenimiento en aerogeneradores.....	20
1.2.1    Tipos de mantenimiento a implementar en aerogeneradores.....	20
1.2.2Herramientas del mantenimiento empleadas en aerogeneradores.....	22
1.3    Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) .....	23
1.3.1    Objetivos del RCM.....	24
2.1 Caracterización del sistema de mantenimiento actual de los aerogeneradores del PE Gibara 1 .....	27
2.1.1Aplicación de la metodología del RCM en la multiplicadora y generador de los aerogeneradores .....	29
2.2 Elaboración del plan de mantenimiento basado en el RCM .....	42
RECOMENDACIONES.....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49
ANEXOS .....	52

## Listado de acrónimos

---

<b>UEB</b>	<b>Unidad Empresarial de Base</b>
<b>RCM</b>	<i>Reliability Centred Maintenance</i> (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad)
<b>PE</b>	Parque Eólico

---

## INTRODUCCIÓN

Las energías renovables han alcanzado una importancia relevante en la sociedad moderna, además de un inevitable incremento en un futuro inmediato. La causa fundamental de este auge es la necesidad de utilizar fuentes de energía alternativa a los combustibles fósiles y libres de emisiones de CO<sub>2</sub> y contaminación.(Martínez, 2011) Todas las fuentes de energía renovables excepto la mareomotriz y la geotérmica, e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen, en último término, del sol. El sol irradia 174.423,000.000,000 Kilowatts de energía por hora hacia la Tierra. Alrededor de un 1 a un 2 por ciento de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica. (Santos-Ruano, 2005)

La energía eólica es la energía obtenida del viento, energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas.

La energía eólica no es algo nuevo, es una de las energías más antiguas junto a la energía térmica. El viento como fuerza motriz existe desde la antigüedad y en todos los tiempos ha sido utilizado como tal, como podemos observar. Tiene su origen en el sol. Así, ha movido a barcos impulsados por velas o ha hecho funcionar la maquinaria de los molinos al mover sus aspas. Pero, fue a partir de los ochenta del siglo pasado, cuando este tipo de energía limpia sufrió un verdadero impulso (Labrada-Castillo, 2017).

La energía eólica crece de forma imparable a partir del siglo XXI, en algunos países más que en otros, pero sin duda alguna en España existe un gran crecimiento, siendo uno de los primeros países por debajo de Alemania a nivel europeo o de Estados Unidos a escala mundial. Su auge en parques eólicos es debido a las condiciones tan favorables que existe de viento, sobre todo en Andalucía que ocupa un puesto principal, entre los que se puede destacar el Golfo de Cádiz, ya que el recurso de viento es excepcional (Labrada-Castillo, 2017).

La utilización de la energía eólica dentro de las fuentes renovables es la que está creciendo más rápidamente. La energía eólica requiere condiciones de intensidad y regularidad en el régimen de vientos para poder aprovecharlos, se considera que



vientos con velocidades promedio entre 5 y 12.5 m/s son los aprovechables. (Orozco-Acosta, 2008)

En la actualidad el uso de aerogeneradores para producir electricidad aprovechando la energía eólica se ha convertido en una de las principales tecnologías en la utilización de fuentes energéticas renovables a nivel mundial. Países como Alemania, España, Dinamarca, Holanda entre otros han apostado por la inclusión de este tipo de máquinas en el fortalecimiento de sus sistemas eléctricos nacionales, siendo los mismos los que presentan mayor producción de electricidad generada a partir del viento. (Sánchez, 2010)

La confianza en los sistemas eólicos de generación de energía eléctrica se ha incrementado notablemente en los últimos quince años, no solamente entre la opinión pública, sino entre los sectores más reacios del negocio energético. La energía eólica es vista por la opinión pública como una fuente de empleo local, y una vía de desarrollo del entorno sin graves incidencias negativas sobre el medio ambiente. La gran aceptación de este tipo de fuente energética junto con la rentabilidad de las instalaciones ha contribuido y contribuye a su rápido desarrollo. (Fragoso-Herrera, 2016)

“Un aerogenerador es un generador eléctrico que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica a través de las palas y en energía eléctrica gracias a un generador” (Guzmán-Aguilar, 2017).

Los aerogeneradores son equipos en los que la aplicación de un correcto plan de mantenimiento es un factor determinante para conseguir una vida larga y efectiva de los mismos y que asegure el valor del activo durante el mayor tiempo posible. (Rodríguez-López, 2015)

La vida útil de una turbina se encuentra entre los 15 y 20 años, lo que supone un funcionamiento óptimo de extracción de energía para aprovechar en su totalidad el funcionamiento y asimismo evitar pérdidas económicas debidas al factor de desgaste en las piezas mecánicas del aerogenerador. El desgaste mecánico es notable al tratar dimensiones de gran escala, por lo que una optimización en el control mecánico y eléctrico de los aerogeneradores es un factor considerable para su estudio. (Asunción, 2012)

“En Cuba como parte de la actualización del modelo económico uno de los proyectos de más importancia es el desplazamiento de la matriz energética de las fuentes fósiles hacia las fuentes renovables de energía” (Córdova-Pérez, 2019).

De acuerdo con los pronósticos realizados, Cuba podría contar con entre 5 000 y 14 000 MW de capacidad de generación a partir de la energía eólica, además de asimilar con rapidez este tipo de tecnología. En distintos lugares de nuestro país se han construido parques eólicos como es el caso de la localidad de Gibara en Holguín que cuenta actualmente con seis máquinas de una potencia de 850 kW cada una para alcanzar una potencia total de 5.1 MW. También en Turiguanó y la Isla de la Juventud se han construido parques eólicos cada uno con una potencia de 0.45 y 1.65 MW respectivamente. (Orozco-Acosta, 2008)

En el PE Gibara 1 perteneciente a la UEB Fuentes Renovables de Energía de la Empresa Eléctrica Holguín, es vital conservar un alto funcionamiento de los equipos, para ello es necesario tener implementado un sistema de mantenimiento que responda a las demandas de estas tecnologías. En el transcurso de los años el plan de mantenimiento establecido por el fabricante de estos aerogeneradores ha sido modificado por los trabajadores del PE, encargados de su operación y mantenimiento, con el objetivo de ajustarlo a las condiciones de explotación actuales.

Sin embargo, durante los 13 años de explotación han ocurrido diversas roturas y paradas imprevistas, afectando la disponibilidad y ocasionado grandes pérdidas de producción. La multiplicadora y el generador, atendiendo a que no tienen un peso importante en el número de fallas, estimando su elevado nivel de criticidad, establecen un gran riesgo que tiene que ser manejado de manera preventiva, ya que cualquier defecto supone notables costos asociados al tiempo de parada por reparación, por lo que surge la necesidad de desarrollar un sistema de mantenimiento basado en la confiabilidad, que permita dar respuestas a las demandas técnicas de estos subsistemas, siendo esta la **situación problémica** de la presente investigación.

**Problema de investigación:**

¿Cómo elaborar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad para la multiplicadora y generador de los aerogeneradores del PE Gibara 1?

**Objeto de estudio:**

Multiplicadora y generador de los aerogeneradores modelo G52-850 kW del PE Gibara 1.

**Campo de acción:**

Sistema de mantenimiento de la multiplicadora y generador de los aerogeneradores modelo G52-850 kW del PE Gibara 1.

**Objetivo general:**

Elaborar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad para la multiplicadora y generador de los aerogeneradores del PE Gibara 1.

**Hipótesis:**

La elaboración e implementación de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, permitirá prevenir las fallas y sus consecuencias, incrementando así la disponibilidad y confiabilidad de la multiplicadora y del generador de los aerogeneradores de estudio.

**Tareas.**

1. Búsqueda bibliográfica y fundamentación teórica del problema a estudiar.
2. Caracterizar a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.
3. Establecer la estructura jerárquica del aerogenerador.
4. Elaborar el plan de mantenimiento preventivo basado en la confiabilidad.
5. Elaborar el informe final.

**Métodos de investigación:**

**Teóricos:**

**Análisis y síntesis:** Con el objetivo de analizar la bibliografía estudiada y de ella sintetizar en los aspectos más importantes.

**Histórico – Lógico:** Se aplicó para establecer el estado del arte del tema de investigación, como un marco teórico referencial, permitiendo conocer qué se ha investigado sobre el tema objeto de estudio, y los aspectos generales que se abordan.

**Empíricos:**

**Consultas a expertos:** Entrevistas y encuestas realizadas a los directivos con mayor conocimiento en el tema en la empresa, así como, técnicos, ingenieros y operarios lo cual contribuyó con la caracterización de la problemática estudiada.

**Revisión de documentos:** Se tomaron como referencia libros, páginas, trabajos de diplomas y otros trabajos realizados en el país que posibilitaron la fundamentación teórica del objeto y el campo de la investigación.

También se supervisaron órdenes de trabajo, expedientes técnicos e informes de mantenimiento realizados.

**Resultados esperados:**

La elaboración de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad para la multiplicadora y generador de los aerogeneradores del PE Gibara 1 y su posterior implementación, permitirá optimizar tareas de mantenimiento.

## CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El presente trabajo de investigación se realiza en el PE Gibara 1, el cual se subordina a la UEB Fuentes Renovables de Energía de la provincia Holguín. El PE de estudio se encuentra ubicado en el municipio de Gibara, en la costa norte de la provincia de Holguín, a 40 km de la ciudad de Holguín. Está compuesto por seis aerogeneradores de 850 kW de potencia cada uno, donde la tecnología de estos pertenece a la compañía GAMESA, la cual es un proveedor líder de soluciones de energía eólica, innovadores y pioneros en el sector de la energía renovable y radica en el país europeo de España.

### 1.1 Aerogeneradores

“Los aerogeneradores son, tal y como indica su nombre, generadores eléctricos que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica” (Kessler, 2019).

Las turbinas eólicas son dispositivos mecánicos diseñados específicamente para la conversión de parte de la energía cinética del viento en energía mecánica utilizable. Varios diseños han sido creados a lo largo del tiempo. Muchos de ellos constan de un rotor que gira alrededor de un eje impulsado por fuerzas, resultadas desde la interacción con el viento. (Asunción, 2012)

Los generadores asincrónicos pueden clasificarse en dos grandes grupos: generadores de velocidad fija y generadores de velocidad variable. Los de velocidad fija fueron los primeros en ser utilizados para aprovechar la energía eólica, y aunque hoy en día todavía se pueden encontrar numerosos parques eólicos, la industria eólica ha ido evolucionado hacia los aerogeneradores de velocidad variable, debido, en primer lugar, a su mayor eficiencia energética, y en segundo lugar, a la mejor calidad de onda que producen. (Orozco-Acosta, 2008)

Guzmán-Aguilar (2017), afirma que los aerogeneradores evacúan la electricidad generada a través de cables conductores (normalmente soterrados) en la subestación, donde se realiza una transformación para elevar la tensión a los niveles adecuados para la transmisión y distribución de la energía.

Las principales partes de un aerogenerador o turbina eólica son:

- Cimentación: los aerogeneradores actuales de eje horizontal están constituidos por una cimentación subterránea de hormigón armado, adecuada al terreno y a las cargas del viento, sobre la cual se levanta una torre.
- Torre: Un aspecto particularmente importante del diseño de torres es la eliminación de la resonancia entre la gama de frecuencias de las paletas que rotan y la frecuencia de resonancia de la torre. (Orozco-Acosta, 2008)
- Rotor: las turbinas de viento modernas de gran escala típicamente se equipan de rotores de tres palas con extensiones de 42 a 80 metros (138 a 262 pies) de diámetro. (Orozco-Acosta, 2008)
- Góndola: es la carcasa que protege el mecanismo interno del aerogenerador. (Kessler, 2019)
- Generador: Aquí vendrá el eje de alta velocidad, para darle revoluciones y poder generar la energía eléctrica generalmente suele ser un generador asíncrono o de inducción. (Santos-Ruano, 2005)
- Eje: constituido de acero al carbono, es sometido a tratamientos de normalizado y enfriamiento al aire. Se mecaniza en toda su longitud y las superficies de rodadura son rectificadas para asegurar el perfecto funcionamiento de los rodamientos. Sobre el eje va alojado el núcleo del rotor. (Labrada-Castillo, 2017)
- Según Larraya (2014) las funciones del aerogenerador están controladas por un sistema de control con los siguientes subsistemas: sistema de regulación, regulación del pitch y regulación de potencia.

Hoy en día los aerogeneradores son del tipo de rotor tripala –tres palas– orientada ésta en la dirección que llega el viento. Las potencias nominales que producen comprenden un abanico muy amplio que va, en el caso del fabricante Gamesa, desde los 850 KW hasta los 2 MW, existiendo ya prototipos a punto de ser comercializados que superan los 4.5 MW. (Larraya, 2014)

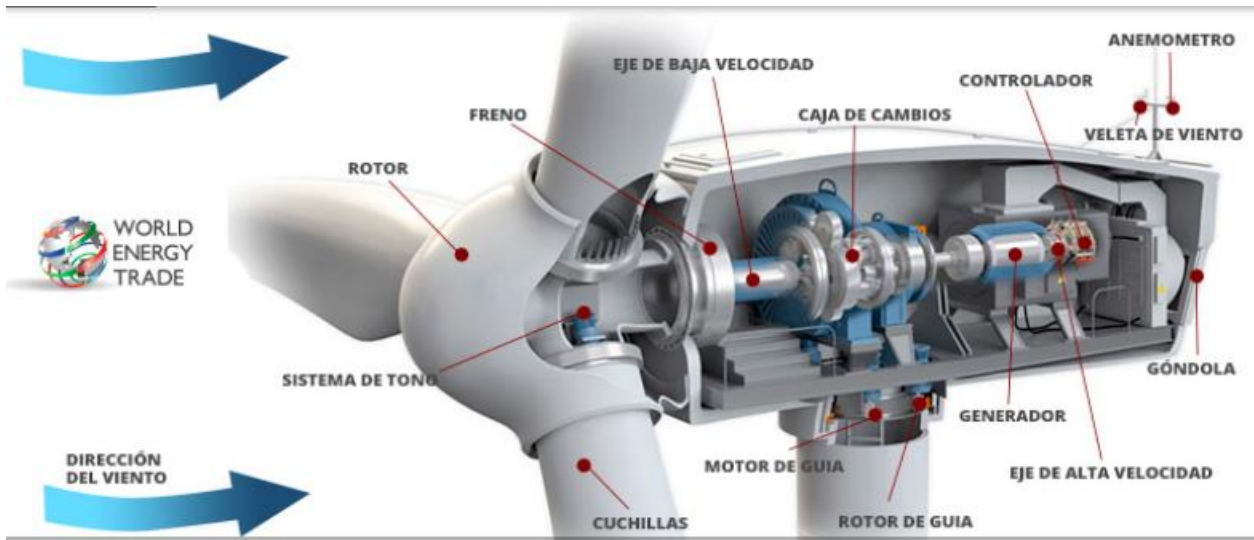


Figura 1. Principales sistemas y componentes de un aerogenerador. Fuente:

<https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/como-funcionan-los-aerogeneradores>

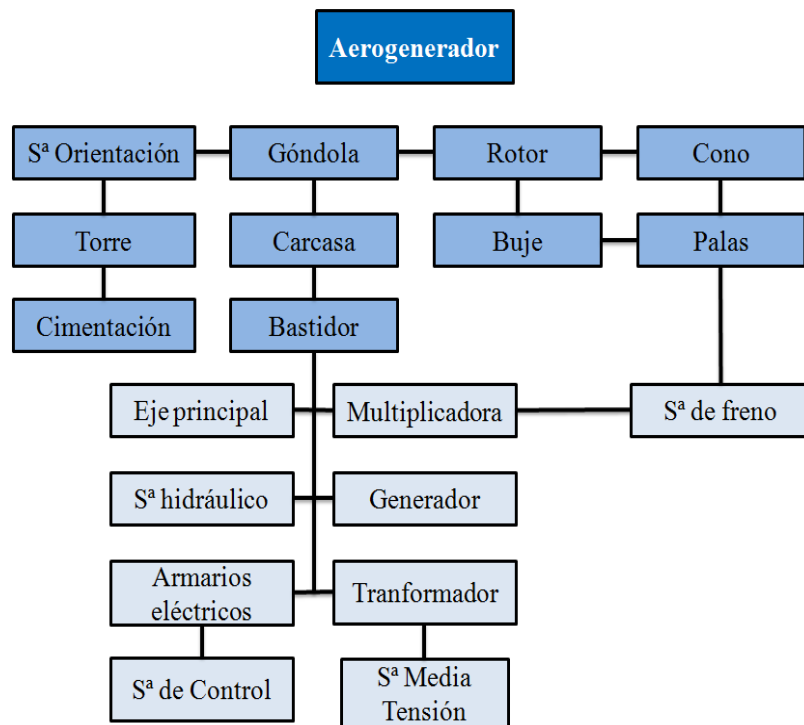


Figura 2. Principales sistemas y componentes de un aerogenerador

Fuente: Larraya, 2014

### 1.1.1 Clasificación de los aerogeneradores

Los aerogeneradores pueden ser clasificados de muchas maneras, las cuales se describen a continuación:

### **Por la posición del aerogenerador**

El aerogenerador puede estar en dos posiciones (vertical y horizontal):

#### **Eje vertical**

Los aerogeneradores de eje de rotación vertical, también denominados como VAWT que proviene de las siglas en inglés *Vertical Axis Wind Turbines*, presentan como principal característica que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo y a la dirección del viento, girando las palas del mismo sobre el citado eje vertical. (Rodríguez-López, 2015)

El inconveniente de este tipo de turbinas es que el eje no supera mucha altura y las velocidades del viento disminuyen al llegar al suelo por efecto de la rugosidad del mismo. La velocidad del viento es muy superior a más altura, con lo que estos aerogeneradores han ido quedando atrás con respecto a los de eje horizontal.

Los aerogeneradores de eje vertical a su vez se clasifican en:

#### **Darrieus**

Estos aerogeneradores consisten en dos o tres palas perfiladas curvadas en forma de C que giran alrededor de un eje vertical. Fue inventado en el año 1925 por el ingeniero francés Georges Darrieus y patentado en 1931. La fuerza que genera el par es del tipo de sustentación ascensional. Presentan una velocidad de giro lenta y un rendimiento poco eficaz para la producción de electricidad por lo que no se fabrican en grandes series. Necesitan un arranque mediante energía suministrada exteriormente. (Rodríguez-López, 2015)

#### **Giromill**

El aerogenerador con rotor Giromill, al igual que el aerogenerador Darrieus, fue patentado por Georges Darrieus. Cuenta también con un eje vertical con palas situadas alrededor del mismo. Las palas son verticales y cambian su orientación a medida que



se produce el giro del rotor, aprovechando de esta manera con más eficiencia la fuerza del viento. (Kessler, 2019)

## **Sabonius**

Esencialmente utilizan el arrastre diferencial creado por las palas que pueden ser de diversas formas. El par de arrastre es elevado, pero la velocidad máxima es claramente inferior a la de los rotores de eje horizontal. (Orozco-Acosta, 2008)

## **Eje horizontal**

Los aerogeneradores de eje horizontal, también denominados como HAWTs que proviene de las siglas en inglés *Horizontal Axis Wind Turbines*, a diferencia de los anteriores, aprovechan más el viento. La altura que se consigue situar el eje que mueve el generador es muy superior a los anteriores y esto se debe que estas turbinas eólicas sean las más utilizadas en la actualidad, pues su tecnología sigue creciendo no sólo por la altura sino por la calidad y medios mejorados de los componentes que se utilizan en la generación de electricidad.

Por la posición del equipo respecto al viento se clasifican en:

### **A barlovento**

“Las máquinas en posición de barlovento necesitan un sistema de orientación activo ya que la velocidad del viento inicialmente incide sobre el rotor eólico y posteriormente sobre la torre” (Martín-Mayordomo, 2015).

### **A sotavento**

Las máquinas orientadas a sotavento utilizan un sistema de orientación pasivo que se basa en inclinar ligeramente las palas para el lado contrario a la torre. La configuración a sotavento es la menos elegida ya que aparecen elevadas cargas aerodinámicas sobre la máquina. Cuando la pala pasa por la zona de influencia de la torre no recibe viento y por lo tanto no transmite par aerodinámico, lo que da lugar a fluctuaciones de potencia y fátiga en los materiales. (Martín-Mayordomo, 2015)

Por el número de palas se clasifican en:

## **Monopala**

Estos únicamente poseen una pala o aspa, al tener sólo una pala estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida útil del equipo.

## **Bipala**

Las turbinas eólicas de dos palas tienen la ventaja del ligero peso soportado por la estructura de la torre, la construcción ligera que permite construir, lo que supone unos costes más bajos. Además, los rotores de dos palas, al ser más ligeros, permite llegar a velocidades de giro superiores a los rotores de tres palas. (Asunción, 2012)

## **Tripala**

Las tres palas son colocadas formando un ángulo de 120 grados entre ellos. La razón por la que este tipo de aerogeneradores es el tipo más empleado, es debido a su alto rendimiento frente a los otros tipos de aerogeneradores (en cuanto a número de palas). (Kessler, 2019)

## **Multipala**

Los rotores multipala se caracterizan por tener un número de palas que puede variar de 6 a 24 y por lo tanto con una solidez elevada. Presentan elevados pares de arranque y una reducida velocidad de giro. La velocidad lineal en la punta de la pala de estas máquinas, en condiciones de diseño, es del mismo orden que la velocidad del viento incidente. Estas características hacen que la aplicación fundamental de estas turbinas haya sido tradicionalmente el bombeo de agua. No se utilizan en aplicaciones de generación de energía eléctrica debido a su bajo régimen de giro. (Martín-Mayordomo, 2015)

Los aerogeneradores del PE Gibara 1 son de eje horizontal debido a su posición, por la posición que se encuentran respecto al viento son a barlovento, y por el número de palas, son tripala.

### **1.1.2 Fallas en los aerogeneradores**

El diagnóstico de fallas es necesario en cualquier proceso automatizado para aumentar el grado de confiabilidad y disponibilidad de los procesos industriales. Aquí estaremos hablando específicamente de las fallas en los aerogeneradores.

Un fallo es el cese de la capacidad de un elemento –toda parte, componente, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que pueda considerarse de manera individual– para realizar una función requerida. Dicho de otro modo, un fallo es un suceso, un evento, un hecho que provoca o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados. Por tanto, tras el fallo el elemento se encuentra en estado de avería. Fallo es el puente, el paso de un estado a otro, la transición del sistema desde su estado satisfactorio a un nuevo estado insatisfactorio, conocido como estado de fallo. (Larraya, 2014)

Está aumentando la necesidad de realizar predicciones de la fiabilidad de los aerogeneradores, así como de su disponibilidad y su vida útil, ya que cualquier parada de la máquina debido a causas que pueden ser fácilmente evitables pueden suponer elevados costes por desconexión de la línea de evacuación a la red. Tan importante como analizar la fiabilidad es analizar los fallos que originan paradas en la máquina, para poder así determinar qué condiciones son las más óptimas para la ubicación y el mantenimiento del parque. (Jiménez-Pariente, 2016)

En diagnóstico industrial, hay modos de fallo observables, y otros no observables. Los observables pueden ser detectados a través de seguimiento de los valores de una o varias variables medidas que lo caracterizan, y permiten establecer ciertas hipótesis sobre cómo de cerca estaría la presencia del modo de fallo. Sin embargo, los modos de fallo no observables son difíciles de predecir a través de seguimiento continuo, al no existir variables que lo delaten. Casos intermedios son aquellos en que los modos de fallo no son observables, pero es posible saber algo de ellos de forma indirecta, a través de algunas variables. (Andrade-Vieira, 2013)

“Para facilitar el desarrollo de un sistema automatizado para la detección de averías en los aerogeneradores, lo primero que se requiere es centralizar y homogeneizar los datos recogidos de los diferentes aerogeneradores” (Martínez, 2011)

La optimización del mantenimiento de una instalación eólica se fundamenta en el conocimiento del comportamiento operativo de los componentes que la integran, la detección temprana de desgastes, degradaciones, mal funcionamientos o fallos incipientes, la estimación de la evolución, temporal de dichos procesos, la evaluación del impacto de potenciales indisponibilidades forzosas o programadas de los diferentes equipos y la formulación de acciones de recuperación adecuadas, tanto preventivas como correctivas. (Rodríguez-López, 2015)

Los elementos tendrán fallos primarios cuando la causa directa o indirecta no es un fallo en otro elemento. Por ejemplo, el desgaste del borde de ataque de las palas se podría explicar por un fenómeno tribológico al estar la pala sometida a la abrasión y adhesión de partículas procedentes del aire. (Larraya, 2014)

Dentro de los distintos tipos de averías que se pueden producir en un aerogenerador, las más importantes en cuanto a tiempo de parada y pérdida de producción son aquellas ligadas a fallos en alguno de los componentes principales del aerogenerador. Especialmente, en aquellas en las que se hace necesario el cambio de la multiplicadora del aerogenerador. (Martínez, 2011)



*Figura 3.* Maniobra de cambio de multiplicadora en aerogenerador.

Fuente: Martínez, 2011

## 1.2 Mantenimiento en aerogeneradores

La palabra <<mantenimiento>>, del latín *manuterer* (de *manu*, mano y de *tenere*, tener) tiene su origen en el vocabulario militar y designaba la acción de mantener operativas y listas para el combate las unidades más experimentadas, gracias a los complementos materiales de los soldados. La idea elemental era que mantener es dominar. Centrándonos más en el concepto actual, la aparición del término en la industria sucedió hacia 1950 en los Estados Unidos. (Larraya, 2014)

Se entiende como mantenimiento el conjunto de acciones de mantenimiento que tienen como objetivo principal preservar un equipo o restaurarlo en el que puede llevar a cabo su función requerida. Se consigue la optimización de los equipos, los procedimientos y los presupuestos para asegurar una mayor fiabilidad y una mayor disponibilidad de los equipos. (Kessler, 2019)

El mantenimiento en aerogeneradores está constituido con el fin de sustentar estos equipos en buen estado, así como todos sus elementos. Esto se hace de diversas formas para evitar el desperfecto temprano de estos equipos, y así, extender su vida útil.

### 1.2.1 Tipos de mantenimiento a implementar en aerogeneradores

Existen diversos tipos de mantenimiento para los aerogeneradores, los más comunes se describen a continuación:

#### **Mantenimiento correctivo**

“La primera técnica de mantenimiento que se utilizó, fue la del mantenimiento correctivo, la cual solo se limitaba a reparar o sustituir los componentes que presentaban averías” Montoya, 2011 (como se citó en Torres-Sainz 2019).

Consiste en la realización de las acciones de mantenimiento una vez que se produzcan los fallos o averías en los equipos. Es decir, se corrigen los errores en el momento en el que surgen. Corregir los errores en el momento en el que surgen tiene como consecuencia que las acciones correctivas no se pueden ni planificar en el tiempo ni es posible calcular el presupuesto necesario. Esto significa que en los equipos surgirán

averías de forma imprevista, lo que se repercute en paradas imprevistas en los procesos de fabricación. (Kessler, 2019)

### **Mantenimiento preventivo**

En su tesis Pupo-Leyva (2017) expone que el mantenimiento preventivo tiene lugar antes de que ocurra una falla, se efectúa bajo condiciones controladas sin la existencia de algún error en el equipo, sino se hace a determinados ciclos de tiempo. Se realiza por medio de recomendaciones del fabricante del equipo o bien a razón de la experiencia del personal a cargo, los cuales son los encargados de determinar el momento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento. Este mantenimiento tendrá lugar cuando:

- Se tengan momentos de baja producción y en tiempo de vientos lentos pocos favorables para la generación eléctrica.
- Existan paros planificados siguiendo un programa previamente elaborado donde se detalla el procedimiento a seguir, y las actividades a realizar, a fin de tener las herramientas y repuestos necesarios. Para esto se deberá tener el personal y equipo adecuado para dar un mantenimiento generalizado de todos los componentes. Esto permitirá a la empresa contar con un historial de todos los equipos, además brinda la posibilidad de actualizar la información técnica de los equipos.

Mantenimiento llevado a cabo a intervalos predeterminados o de acuerdo con criterios prescritos y destinado a reducir la probabilidad de fallo o la degradación del funcionamiento de un elemento. El mantenimiento preventivo significa que es planificado y periódico. El mantenimiento se lleva a cabo con intervalos iguales para evitar que ocurran fallos. (Moreno-Carreras, 2017)

### **Mantenimiento predictivo**

González-Jorge (2018), asegura que es el tipo de mantenimiento que requiere de mucha información y análisis para aplicarse, porque busca descubrir cuándo y cómo sucederá la falla y estar preparado para solucionarla.

Por supuesto, para este tipo de mantenimiento necesitas operarios que puedan ser capaces de tomar decisiones correctas en el momento. Es recomendable en las empresas porque elimina el tiempo de aviso a los directores de operaciones y no detiene la producción.

A pesar de que el problema sea solucionado, es importantísimo que notifiqués la falla cuando puedas (describiéndola en sí, el contexto, el momento y si se repite) para que se puedan tomar acciones futuras.

Se aplica en equipos que bajo ningún concepto pueden sufrir una avería y que por tanto tenga un nivel de disponibilidad alto (alto coste económico por una parada y/o avería). Para mantener estos equipos es necesario técnicas de mantenimiento predictivo (estado del equipo, paradas programadas, revisión general completa, sustitución periódica de repuestos del equipo para evitar desgastes excesivos). Este modo de mantenimiento tiene como objetivo llegar a las cero averías del equipo. (Torres-Sainz, 2019)

### **Mantenimiento proactivo**

Está basado en datos recolectados de los equipos que usan los jefes, supervisores y planificadores para coordinar el mantenimiento. Entonces pasamos de una óptica reactiva a una proactiva. Esta recopilación de datos ha permitido beneficiarnos de la planificación del mantenimiento, en el cual se incluirá las actividades de mantenimiento, los plazos establecidos de ejecución de tareas y todo ello se plasmará en un cronograma detallado de tareas. Guy Deighton, 2016 (como se citó en Andrade-Quiroz, 2020)

#### **1.2.2 Herramientas del mantenimiento empleadas en aerogeneradores**

Según Sainz-Carrera (2020), para establecer estrategias efectivas hoy en día existen muchas herramientas:

- ✓ Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).
- ✓ Revisión de Tareas de Mantenimiento.
- ✓ Optimización del Plan de Mantenimiento (PMO).

- ✓ Desarrollo del Plan de Mantenimiento.
- ✓ Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMEA/FMECA).

En su proyecto Larraya (2014) expone que es importante comprender que no es lo mismo una técnica organizativa, como puede ser el RCM o TPM, que un mantenimiento predictivo, que es una “mantecnología” o una metodología tecnológica a utilizar como herramienta.

Por aclarar esta última idea: el RCM es una técnica que nos ayuda a replantear todo el mantenimiento con base en la fiabilidad o análisis de fallos, y utiliza la tecnología de mantenimiento llamada predictiva. Así mismo, el TPM es otra técnica organizativa basada en transferir al área de producción de una empresa gran parte–o todas– las actividades de mantenimiento, pero no es una metodología tecnológica propiamente dicha.

### 1.3 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad o RCM por sus siglas en inglés, surgió en la tercera generación del Mantenimiento, es decir a comienzos de los años 80, de trabajo definidas, en función de qué tan críticos son los activos, tomando en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de falla que estos activos, a la seguridad, al ambiente, a las operaciones. El RCM determina el estado crítico de los equipos de cualquier proceso y, basado en esa información implementa un Mantenimiento Preventivo/Predictivo para las organizaciones. (Montilla, 2007)

Es un proceso utilizado para determinar lo que debe hacerse para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operativo presente. Además, si se aplica correctamente, RCM transformará las relaciones entre las empresas que lo utilizan, sus activos físicos existentes y las personas que operan y mantienen esos activos. (Andrade-Quiroz, 2020)

El RCM es una técnica organizativa que nos ayuda a replantear todo nuestro mantenimiento con base en la fiabilidad o análisis de fallos y utiliza, entre otras y como táctica de mantenimiento tras el análisis de dichos fallos, la tecnología de mantenimiento llamada Predictivo. (Martín-Mayordomo, 2015)



El RCM es un método de amplia utilización para las necesidades de mantenimiento de cualquier tipo de activo físico en su entorno de operación.

En su trabajo de maestría Labañino-Fernández (2013) expone que el RCM es un enfoque sistémico para diseñar programas que aumenten la confiabilidad de los equipos con un mínimo de costo y riesgo, para ello combina aplicaciones técnicas de mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y proactivo mediante estrategias fundamentadas técnica y económicamente, lleva a mejoras rápidas sostenidas y sustanciales en la disponibilidad y confiabilidad de planta, calidad del producto, seguridad e integridad ambiental.

El RCM es una herramienta que permite determinar las consecuencias que puede traer una falla en la economía, al medio ambiente y a los obreros de la empresa que pertenece el sistema o elemento que se analiza.

### 1.3.1 Objetivos del RCM

El objetivo del RCM no es conservar la condición operativa de los equipos, sino garantizar que el equipo cumpla la función o funciones para las cuales ha sido introducido en un proceso productivo, es decir, el RCM se centra en garantizar la máxima confiabilidad de un proceso/equipo, entendiendo la Confiabilidad como la probabilidad de que un equipo no falle durante su operación. (Montilla, 2007)

El objetivo principal del RCM es mejorar la fiabilidad funcional de los sistemas con una adecuada seguridad y disponibilidad, que permita prevenir los fallos y minimizar el costo del mantenimiento implicado. Definir correctamente la estrategia de mantenimiento para mejorar la relación costo/ riesgo.

Según Larraya (2014) los objetivos del RCM son los siguientes:

- Analizar con una metodología rigurosa y auditable cada tipo de fallo o avería de la forma más estricta y profunda, estudiando el modo y forma en que se producen dichos fallos y como éstos se traducen en costes y repercusiones.
- La productividad global de Departamento de Mantenimiento debe mejorarse mediante una forma de trabajo más avanzada, proactiva y planificada.

- Tras el trabajo de estudio y definición de táctica es necesaria (o muy conveniente) una auditoría imparcial antes de su implantación real.
- Se debe contar con el apoyo activo y cooperación del personal de mantenimiento, el de operación o producción, el personal técnico o de ingeniería y el administrativo.

### 1.3.2 Fases y metodologías del RCM

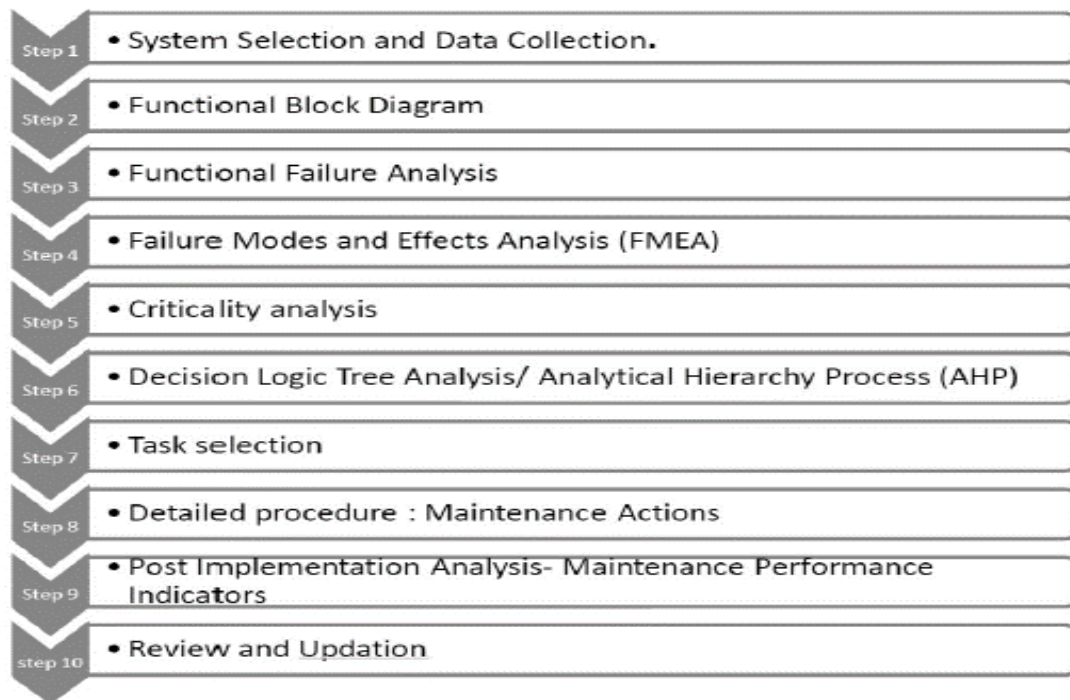
Aguinaga-Barragán (2007), asegura que el RCM define inicialmente el contexto operacional y más adelante, RCM hace una serie de preguntas acerca de cada uno de los elementos seleccionados, como sigue:

1. ¿Cuáles son las funciones?
2. ¿De qué forma puede fallar?
3. ¿Qué causa que falle?
4. ¿Qué sucede cuando falla?
5. ¿Qué ocurre si falla?
6. ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?
7. ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?

De acuerdo a Moubray, la metodología de RCM parte de determinar los equipos críticos de la instalación, es basado en los resultados del APS (Análisis Probabilista de Seguridad), la aplicación de técnicas de análisis de causa de fallo, a partir de la consulta de los registros de planta, y de la implementación de una política de mantenimiento enfocada en la confiabilidad, dirigida a corregir las causas de fallo de los equipos críticos. La optimización se logra priorizando esfuerzos sobre la base de la aplicación del Principio de Pareto en profundidad, y dentro de diversos niveles de análisis de contribuyentes a la seguridad de la instalación indisponibilidad de los sistemas. La aplicación de mantenimiento correctivo nunca se descarta y queda como opción para los equipos críticos en caso de fallos, y como política preferente de mantenimiento para los componentes con bajo efecto sobre la seguridad de la instalación y la indisponibilidad de los sistemas. (Rivero-Rivero, 2018)

En su investigación Andrade-Quiroz (2020) plantea que para implementar RCM al mantenimiento preventivo de los equipos se debe complementarlos 10 pasos para su ejecución respondiendo a las preguntas importantes de acuerdo al orden descrito. Las

etapas del 1 al 3 sobre el conocimiento del sistema y funciones; las etapas del 4 al 8, modos de fallas que podría causar la pérdida de función esto está soportado con el juicio de expertos de personal de campo; la etapa 8 contempla la aplicación de los resultados lógico de la decisión, finalmente post análisis de la implementación y revisión de la actualización.



*Figura 4.* Estrategia de la implementación del RCM

Fuente: Modificado de Vishnu & Regikumar, 2016 (como se citó en Andrade-Quiroz, 2020)

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM) PARA LOS AEROGENERADORES DEL PARQUE EÓLICO GIBARA 1

### 2.1 Caracterización del sistema de mantenimiento actual de los aerogeneradores del PE Gibara 1

La información expuesta en las tablas que se muestran a continuación proviene de la documentación técnica de la UEB Fuentes Renovables de Energía y facilitada por la misma para la realización de este trabajo. Estas tablas solo muestran un breve resumen del plan de mantenimiento en sentido general.

Según las especificaciones técnicas de mantenimiento que ofrece el fabricante para los aerogeneradores Gamesa del PE Gibara 1, está establecido un plan de revisiones de mantenimiento preventivo semestral (B1) y anual (C1) (tabla 2.1). Para el caso de las revisiones semestrales se realizan un total de 146 operaciones y para las revisiones anuales un total de 169 operaciones.

Tabla 2.1 Revisiones de mantenimiento preventivo.

Parque Eólico	Fabricante	Modelo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Gibara 1	Gamesa	G52-850	B1						C1					

Seguidamente, se muestra en la tabla 2.2 la actual planificación semanal de las inspecciones de mantenimiento mecánico (M) y eléctrico (E) para el PE Gibara 1.

Tabla 2.2 Planificación semanal de las inspecciones de mantenimiento.

Gibara 1		
Tipo de Mantenimiento	B1	C1
Semana 1	M1	M1
	M1	M1
	M2,E1	M2,E1
	M2,E1	M2,E1
	Preparación mantenimiento próxima semana	
Semana 2	M3,E2	M3,E2
	M3,E2	M3,E2

	M4,E3	M4,E3
	M4,E3	M4,E3
<b>Semana 3</b>	Preparación mantenimiento próxima semana	
	M5,E4	M5,E4
	M5,E4	M5,E4
	M6,E5	M6,E5
	M6,E5	M6,E5
<b>Semana 4</b>	Preparación mantenimiento próxima semana	
	E6	E6
	E6	E6

A continuación, en la tabla 2.3, se muestra el plan de mantenimiento actual implementado para el caso específico de los subsistemas multiplicadora y generador de los aerogeneradores del PE Gibara 1.

Tabla 2.3 Plan de mantenimiento.

Equipo: aerogenerador

Fabricante: GAMESA

Modelo: G52-850kW

Plataforma: G5X

---

**Operación a realizar**

	<b>B 1</b>	<b>C 1</b>
<b>Multiplicadora</b>		
Comprobar fugas. Si las fugas proceden del tapón de vaciado de aceite, éste se debe sustituir en su totalidad o sólo su junta.	X	X
Comprobar el nivel de aceite (en parado). Aceite: (Ver Carta de lubricación de G52/G58 – ES300001).	X	X
Comprobar estado del aceite	X	X
Comprobar indicador magnético	X	X
Muestra de aceite	X	X
Cambio de aceite (si procede)	X	X
Aceite: (Ver Carta de lubricación de G52/G58 – ES300001)		
Filtro de aire	X	X
Comprobación de vibraciones	X	X
Comprobación de ruidos en funcionamiento	X	X
Comprobación de holguras	X	X
Comprobación del interior	X	X
Comprobación de rodamientos	X	X
Comprobación de engranajes	X	X
Comprobación de pintura	X	X

Alineado	X	X
Comprobar holgura eje multiplicadora – casquillo eje principal.	X	X
Control del estado general de la multiplicadora a los 10 años de funcionamiento.		
Cambio de la válvula termostática del bloque de válvulas. Si procede.		X
Comprobar el estado del tapón de vaciado de aceite. Si fuga, o en alguno de los procedimientos se ha visto que está deteriorado se debe proceder a su cambio. Se procederá de igual modo si ocurre algo similar con cualquier otra conexión o tapón de la multiplicadora o del bloque de válvulas.	X	X
<b>Generador</b> (Advertencia: antes de cualquier comprobación de parte eléctricas, verificar que no haya tensión en zonas de potencia)		
Apretar los terminales de la caja de bornas. Rotor: $98 \pm 9\text{Nm}$ Estator: $98 \pm 9\text{Nm}$	X	X
Comprobar los rodamientos	X	X
Engrasar el rodamiento delantero. (Ver Carta de lubricación de G52/G58 – ES300001)	X	X
Engrasar el rodamiento trasero. (Ver Carta de lubricación de G52/G58 – ES300001)	X	X
Comprobar silent blocks del generador.		X
Comprobar conexiónado embarrado de potencia del top	X	X
Comprobar sujeción del tubo flexible de ventilación	X	X

### 2.1.1 Aplicación de la metodología del RCM en la multiplicadora y generador de los aerogeneradores

Dentro de un aerogenerador ocurren diferentes tipos de averías, las más cruciales son aquellas fallas que ocurren en la multiplicadora y el generador, ya que se hace necesario un cambio en estos subsistemas, que son los más críticos y, a la vez, trae consigo pérdida de producción y tiempo de parada. Por esto es importante aplicar la metodología del RCM en estos subsistemas.

A continuación, se emplean las siete preguntas básicas del RCM a la multiplicadora y al generador:

#### **MULTIPLICADORA**

De forma general

##### **1. ¿Cuáles son las funciones?**

- Multiplica las revoluciones de giro del conjunto buje – aspas y divide en la misma proporción la fuerza de dicho eje.

## **2. ¿De qué forma puede fallar?**

- En cada una de las tres fases de la multiplicadora, denominadas etapa de baja velocidad, etapa planetaria y etapa de salida o de alta velocidad, pueden producirse fallos vinculados a los engranajes que las constituyen y sus rodamientos.

## **3. ¿Qué causa que falle?**

- Las causas más frecuentes de falla de multiplicadoras son los rodamientos, estas fallas pueden ser producto a fluctuaciones de carga, desalineamiento, condiciones térmicas inadecuadas e incorrecta lubricación. Los segundos elementos que más fallas presentan son los engranes, y se debe a cargas excesivas o a vibraciones.

## **4. ¿Qué sucede cuando falla?**

- En la multiplicadora puede haber fallos producidos por desgastes derivados de la operación, fatiga de los componentes o por contaminaciones externas (por agua, aire o partículas de polvo) que pueden hacer que el sistema de lubricación provoque un desgaste acelerado de los componentes. Puede suceder una parada total del equipo.

## **5. ¿Qué ocurre si falla?**

- Cuando existen fallas que dan paso a averías en la multiplicadora el equipo deja de cumplir su función por lo que ocurre una parada imprevista, por lo que ocurren pérdidas de producción y mayor gasto en el mantenimiento correctivo.

## **6. ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?**

- Las técnicas de monitoreo se pueden usar hasta cierto punto para identificar fallos antes de que se vuelvan críticos.

Las técnicas de monitoreo para la multiplicadora son:

- Análisis de vibraciones.

El Análisis de Vibración es una técnica utilizada para identificar y predecir anomalías mecánicas en maquinaria industrial, midiendo la vibración e identificando las frecuencias involucradas. Estas vibraciones son registradas por uno o varios acelerómetros y los datos son procesados por un analizador de espectro. La

aplicación de esta técnica en el mantenimiento predictivo mejora en gran medida la eficiencia y la fiabilidad en la maquinaria industrial.

El Parque Eólico Gibara 1, cuenta con sensores de vibraciones instalados para darles seguimiento vía on-line, sin embargo, desde su montaje y puesta en marcha en el año 2008, estos sensores han estado desconectado del sistema de control por temas de seguridad nacional, lo cual limita el registro y prevención de fallas.

- Análisis de aceite.

El análisis de aceites no es más que una serie de pruebas de laboratorio que se usan para evaluar el estado de los lubricantes usados, los residuos y contaminantes que están presentes, para luego elaborar un diagnóstico sobre la condición de desgaste del equipo.

- Monitoreo de temperaturas.

Consiste en analizar y procesar todos los valores de temperatura existentes mediante sensores. Se envía toda la información hacia computadoras, donde se analizan estos datos, para distinguir las posibles fallas.

- Para prevenir las fallas en la multiplicadora se realiza una serie de tareas predictivas, por ejemplo, inspección visual y boroscopía, esta técnica consiste en la inspección de las partes internas de la multiplicadora sin necesidad de realizar grandes desmontes y que, en este caso, se trata de diagnosticar en qué estado se encuentran las superficies de los engranajes.
- Verificación de acoplamiento de eje de alta velocidad.
- Verificación de la alineación del eje de alta velocidad y cálculo de las compensaciones para realinear el tren de acoplamiento.

## **7. ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?**

- Cualquier tipo de falla en la multiplicadora es considerado de alta criticidad, por lo cual, en caso de no poder detectar la falla existen dos posibles casos, que el equipo pueda desempeñar su función, pero no correctamente, o que no logre desempeñar su función en lo absoluto y, por tanto, la parada no planificada del equipo.

De forma particular

### **1. ¿Cuáles son las funciones?**



- Rodamientos
  - Transferir el movimiento, es decir, apoyan y guían componentes que giran entre sí, y transmiten fuerzas.
- Engranajes
  - Transmitir movimiento circular mediante el contacto de ruedas dentadas, de manera que una de las ruedas está conectada por la fuente de energía y es conocida como rueda motriz y la otra está conectada al eje que debe recibir el movimiento del eje motor y que se denomina rueda conducida.
- Ejes
  - Son usados para soportar componentes rotatorios (rodamientos, por ejemplo).
  - Son aprovechados para transmitir potencia o movimiento por rotación o movimiento axial.

## **2. ¿De qué forma puede fallar?**

- Rodamientos
  - Descascarillado por fatiga (se producen grietas en la superficie).
  - Desgaste abrasivo debido a la lubricación inadecuada.
  - Corrosión por humedad y por fricción.
  - Deformación plástica por sobrecarga.
  - Fracturas y agrietamientos.
  - Fallos por pasos de corriente.
- Engranajes
  - Rotura.
  - Desgaste.
  - Fatiga superficial.
  - Deformación plástica.
- Ejes
  - Abrasión en los apoyos de los rodamientos.
  - Agrietamiento.
  - Deformaciones.
  - Fatiga del material.
  - Corrosión.

### **3. ¿Qué causa que falle?**

- Rodamientos
  - Debido a fatiga.
  - Debido a problemas de lubricación (lubricante, cantidad o intervalo de lubricación incorrectos).
  - Debido a la contaminación (sellos ineficaces).
  - Debido al montaje incorrectos, a carga más pesada o distinta de la anticipada, a ajustes incorrectos o inadecuados.
- Engranajes
  - Lubricación inadecuada.
  - Inclusiones no metálicas.
  - Mal ensamblaje.
  - Fallas de diseño o fabricación.
  - Sobrecargas continuas.
  - Errores de operación del equipo.
- Ejes
  - Tratamientos superficiales.
  - Sobrecargas.
  - Errores de diseño.
  - Técnicas de construcción inadecuadas.
  - Desalineación.
  - Desbalance.

### **4. ¿Qué sucede cuando falla?**

- Rodamientos
  - Cuando ingresan contaminantes en forma de partículas a través de los sellos, los elementos rodantes pueden causar su desplazamiento excesivo.
  - Se crean indentaciones en los caminos de rodadura. Las partículas duras pueden causar indentaciones con bordes afilados.
  - Se inicia la fatiga de superficie y el metal comenzará a desprenderse del camino de rodadura. Esto se denomina descascarillado.
- Engranajes

- Aparecen surcos en los dientes producto al desgaste abrasivo.
- Se producen cráteres longitudinales en los extremos de los dientes.
- Superficie picada debido a las descargas eléctricas.
- Aparece el óxido con depósitos color marrón rojizos en la superficie del engranaje.
- Aparecen surcos y partículas marrón rojizas a lo largo de la línea de contacto.
- Surgen cavidades que se extienden a toda la superficie del pie de los dientes.
- Nacen surcos en las líneas de paso debido a la deformación plástica.
- Ejes
  - Se desarrolla una grieta que debilita el eje.
  - Ruptura del eje.
  - Se altera la rectitud del eje.
  - Se presenta ataque corrosivo sobre la superficie del eje, dañando su acabado superficial y dejando residuos.

#### **5. ¿Qué ocurre si falla?**

- Rodamientos
  - No transfiere movimiento.
  - No transmite fuerzas.
- Engranajes
  - No transmite movimiento circular.
- Ejes
  - No transmite potencia.
  - No transmite movimiento por rotación.

#### **6. ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?**

- Rodamientos
  - Monitoreo de vibraciones.
  - Monitoreo de temperaturas.
  - Comprobar si hay desgaste, daño y fugas en los sellos.
  - Asegurarse de aplicar la cantidad correcta de grasa al relubricar.
  - Asegurarse de que el intervalo de relubricación es correcto.
  - Comprobar la alineación.
  - Comprobar el correcto balanceo de las palas.

- Engranajes
  - Monitoreo de vibraciones.
  - Monitoreo de temperaturas.
  - Realizar análisis de aceites a la caja multiplicadora.
  - Efectuar la boroscopía.
- Ejes
  - Monitoreo de vibraciones.
  - Evitar que la velocidad de operación se aproxime o coincida con una de las velocidades críticas (monitoreo de las rpm).
  - Comprobar alineación.
  - Balanceo de las palas.

## **7. ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?**

- Rodamientos
  - El rodamiento se daña tan pronto como ocurre el descascarillado. Esto no significa que el rodamiento no pueda seguir en servicio. El descascarillado aumenta gradualmente y origina los niveles de ruido y vibración en el equipo. El equipo se debe detener y reparar antes de que el rodamiento colapse.
  - El desgaste abrasivo es un proceso degenerativo que eventualmente destruye la microgeometría del rodamiento porque las partículas de desgaste reducen aún más la eficacia del lubricante.
  - Se forma una delgada película protectora de óxido sobre el acero limpio cuyas superficies están expuestas al aire. Sin embargo, esta película no es impenetrable, y si el agua o los agentes corrosivos entran en contacto con las superficies de acero, puede ocurrir oxidación.
  - Como resultado de la corrosión por contacto, es posible que los aros del rodamiento no estén apoyados uniformemente, lo que puede tener un efecto perjudicial en la distribución de carga del rodamiento.
- Engranajes
  - Aparece la vibración, el ruido y el calor.
  - Puede ocurrir una sobrecarga por torque y/o velocidad y/o impactos en los equipos.
  - La rotura de los dientes de engranajes.

- No multiplica la relación de transmisión especificada o no posee la suficiente para el correcto funcionamiento en el equipo.
- Ejes
- Se presentan oscilaciones y vibraciones fuertes que ocasionan esfuerzos exagerados en la máquina y funcionamiento inadecuado.
- Ocurren fallas por fatiga o por deformaciones exageradas.
- Puede ocurrir un hecho catastrófico, acarreado daños irreparables y costosas.

## **GENERADOR**

De forma general

### **1. ¿Cuáles son las funciones?**

- El generador es el encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica que se proporcionará a la red.

### **2. ¿De qué forma puede fallar?**

- Sobrecalentamiento en el rotor.
- Conexión eléctrica en mal estado.

### **3. ¿Qué causa que falle?**

- Pocas pruebas de funcionamiento.
- Insuficiente revisión de los componentes (escobillas, conexiones, lubricación, entrehierros, devanados, etc).
- Falta de lubricación.
- Problemas eléctricos.
- Desalineación.

### **4. ¿Qué sucede cuando falla?**

- En el peor de los casos sucedería un incendio en la góndola del aerogenerador y, por tanto, deja de desempeñar su función.
- Sobrecalentamiento.
- Ruidos anormales.
- Vibraciones excesivas.

### **5. ¿Qué ocurre si falla?**

- Desmontaje del generador para realizar las acciones de reparación.

- Tiempo de parada imprevisto
- Mayor costo de mantenimiento.
- Pérdida de producción de energía.

## **6. ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?**

Para prevenir las fallas hay que realizar una inspección del generador, la cual consiste en las siguientes acciones:

- Análisis de vibración.
- Monitoreo de temperaturas.
- Verificación de acoplamiento de eje de alta velocidad.
- Verificación de la alineación del eje de alta velocidad y cálculo de las compensaciones para realinear el tren de acoplamiento.
- Prueba de aislamiento del generador (estator y rotor).

## **7. ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?**

- Paradas imprevistas.
- Se afecta la producción de energía.
- Pérdida económica.

De forma particular

### **1. ¿Cuáles son las funciones?**

- Rodamientos
  - Transferir el movimiento, es decir, apoyan y guían componentes que giran entre sí, y transmiten fuerzas.
- Estator
  - Está formado por un electroimán que produce un campo magnético fruto de la corriente que recibe desde el regulador a través de los anillos rozantes situados en el eje. Cuando este campo magnético está activo, las bobinas del estator (parte fija del alternador) reaccionan produciendo la corriente eléctrica necesaria.
- Rotor.
  - Permite el paso de la corriente eléctrica de alto voltaje que proviene de la bobina. Se encuentra envuelto en un cableado denominado bobina, y su campo magnético es

opuesto al de la parte estática del estator. Este es el hecho que hace que el rotor comience a girar.

## **2. ¿De qué forma puede fallar?**

- Rodamientos
  - Descascarillado por fatiga (se producen grietas en la superficie).
  - Desgaste abrasivo debido a la lubricación inadecuada.
  - Corrosión por humedad y por fricción.
  - Deformación plástica por sobrecarga.
  - Fracturas y agrietamientos.
  - Fallos por pasos de corriente.
- Estator.
  - Corrosión.
  - Deformación.
  - Desequilibrio de voltaje.
- Rotor.
  - Quiebre de barras y anillos del rotor.
  - Irregularidades en el entrehierro (excentricidades estáticas y dinámicas).
  - Desbalanceos.

## **3. ¿Qué causa que falle?**

- Rodamientos
  - Debido a fatiga.
  - Debido a problemas de lubricación (lubricante, cantidad o intervalo de lubricación incorrectos).
  - Debido a la contaminación (sellos ineficaces).
  - Debido al incorrecto montaje o manipulación, a carga más pesada o distinta de la anticipada, a ajustes incorrectos o inadecuados.
- Estator.
  - Sobre calentamiento del bobinado.
  - Exceso de carga.
  - Acumulación de partículas.
  - Soportes rotos.

- Rotor.
- Contaminación.
- Instalación incorrecta.
- Rotura de la barra del rotor debido a la fatiga.
- Desequilibrio.
- Sobrecalentamiento en el devanado.
- Fricción entre el rotor y el estator.

#### **4. ¿Qué sucede cuando falla?**

- Rodamientos
  - Aumento de temperaturas, vibraciones y ruidos.
  - Cuando ingresan contaminantes en forma de partículas a través de los sellos, los elementos rodantes pueden causar su desplazamiento excesivo.
  - Se crean indentaciones en los caminos de rodadura. Las partículas duras pueden causar indentaciones con bordes afilados.
  - Se inicia la fatiga de superficie y el metal comenzará a desprenderse del camino de rodadura. Esto se denomina descascarillado.
- Estator.
  - Aumento de temperaturas, vibraciones, ruidos, mayor consumo eléctrico.
  - Cuando hay entrada de agentes externos puede suceder la corrosión.
  - La acumulación de suciedad puede aumentar la temperatura de funcionamiento del motor.
  - Aparece el óxido.
  - Puede suceder un cortocircuito.
- Rotor.
  - Aumento de temperaturas, vibraciones, ruidos, mayor consumo eléctrico, pérdida de eficiencia.
  - Se daña el cableado.
  - Con la presencia de humedad aparece el óxido.
  - Presencia de grietas en el eje del rotor.

#### **5. ¿Qué ocurre si falla?**

- Rodamientos



- No transfiere movimiento.
- No transmite fuerzas.
- Queda indisponible el aerogenerador.
- Estator.
  - Contaminación.
  - Altas temperaturas.
  - Los soportes se rompen.
  - Vibraciones excesivas.
  - Queda indisponible el aerogenerador.
- Rotor.
  - No gira.
  - No hay paso de corriente eléctrica.
  - Queda indisponible el aerogenerador.

## **6. ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?**

- Rodamientos
  - Monitoreo de vibraciones.
  - Monitoreo de temperaturas.
  - Comprobar si hay desgaste, daño y fugas en los sellos.
  - Asegurarse de aplicar la cantidad correcta de grasa al relubricar.
  - Asegurarse de que el intervalo de relubricación es correcto.
  - Comprobar la alineación.
  - Capacitar al personal de mantenimiento en su montaje, manipulación, almacenamiento y lubricación.
- Estator.
  - Monitoreo de temperaturas.
  - Comprobar que no haya filtración de partículas desde el exterior.
  - Comprobar el sistema de ventilación para evitar los sobrecalentamientos.
  - Comprobar que no haya fuga de corriente para evitar un cortocircuito.
  - Realizar una limpieza de los componentes eléctricos.
  - Realizar comprobaciones e inspecciones eléctricas según recomendaciones del fabricante.

- Capacitar al personal de mantenimiento en mantenimientos eléctricos.
- Monitoreo de variables eléctricas y su comparación con los parámetros de trabajo establecidos por el fabricante.
- Rotor.
  - Monitoreo de vibraciones.
  - Monitoreo de temperaturas.
  - Inspecciones eléctricas.
  - Inspecciones en portaescobillas, escobillas, anillos y demás elementos que componen el rotor, según instrucciones del fabricante.
  - Comprobar la alineación.

## **7. ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?**

- Rodamientos
  - El rodamiento se daña tan pronto como ocurre el descascarillado. Esto no significa que el rodamiento no pueda seguir en servicio. El descascarillado aumenta gradualmente y origina los niveles de ruido y vibración en el equipo. El equipo se debe detener y reparar antes de que el rodamiento colapse.
  - El desgaste abrasivo es un proceso degenerativo que eventualmente destruye la microgeometría del rodamiento porque las partículas de desgaste reducen aún más la eficacia del lubricante.
  - Se forma una delgada película protectora de óxido sobre el acero limpio cuyas superficies están expuestas al aire. Sin embargo, esta película no es impenetrable, y si el agua o los agentes corrosivos entran en contacto con las superficies de acero, puede ocurrir oxidación.
  - Como resultado de la corrosión por contacto, es posible que los aros del rodamiento no estén apoyados uniformemente, lo que puede tener un efecto perjudicial en la distribución de carga del rodamiento.
- Estator.
  - Surgen anomalías donde se pueden ver afectados otros componentes del generador.
  - Sucede un cortocircuito donde puede ocurrir un incendio en la góndola.

- Si no se realizan inspecciones periódicas puede filtrarse humedad, lo que trae consigo óxido y sulfataciones.
- La falta de alimentación eléctrica adecuada puede ocasionar poca generación de energía.
- Rotor.
  - La dificultad de la distribución de corriente permite que no haya funcionamiento, lo cual hace que no haya producción.
  - La no confirmación del paso de corriente hace que ocurra un consumo excesivo, fugas.
  - La no realización de análisis de vibraciones y de temperatura de manera sistemática trae como efecto ruidos exagerados y sobrecalentamiento en el generador.

## 2.2 Elaboración del plan de mantenimiento basado en el RCM

Teniendo en cuenta la información obtenida después de aplicar las siete preguntas de la metodología RCM en cada uno de los elementos que componen la multiplicadora y generador se establece un plan de mantenimiento de estos subsistemas, pertenecientes a los aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1.

Tabla 2.4 Plan de mantenimiento.

Componentes	Elementos	Fallas	Modos de fallas	Prevención de las fallas	Frecuencia de Mto
Multiplicadora	Rodamientos	Descascarillado por fatiga (se producen grietas en la superficie).	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Debido a fatiga.</li> <li>● Debido a problemas de lubricación (lubricante, cantidad o intervalo de lubricación incorrectos).</li> <li>● Debido a la contaminación (sellos ineficaces).</li> <li>● Debido al montaje incorrecto, a carga más pesada o distinta de la anticipada, a ajustes incorrectos o inadecuados.</li> </ul>	Monitoreo de vibraciones.	Cada 10 minutos recoger vibraciones globales y cada una hora realizar análisis espectral (online).
		Desgaste abrasivo debido a la lubricación inadecuada.		Monitoreo de temperaturas.	Cada 10 minutos recoger valores de temperaturas y compararlas con el patrón establecido (online).
		Corrosión por humedad y por fricción.		Comprobar la alineación.	Según lo establecido por el fabricante y por cada fallo tres fallos en la red

					eléctrica, debido a frenados bruscos.
		Deformación plástica por sobrecarga.		Comprobar si hay desgaste, daño y fugas en los sellos.	Según los resultados obtenidos del análisis de aceite o grasa, vibraciones y temperaturas.
		Fracturas y agrietamientos.		Aplicar la cantidad correcta de grasa al relubricar.	Según los resultados obtenidos del análisis de vibraciones y temperaturas.
	Engranajes	Rotura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubricación inadecuada.</li> <li>• Inclusiones no metálicas.</li> <li>• Mal ensamblaje.</li> </ul>	Monitoreo de vibraciones.	Cada 10 minutos recoger vibraciones globales y cada una hora realizar análisis espectral (online).
		Desgaste.		Monitoreo de temperaturas.	Cada 10 minutos recoger valores de temperaturas y compararlas con el patrón establecido (online).
		Fatiga superficial.		Realizar análisis de aceites.	Según los resultados obtenidos del análisis de vibraciones y temperaturas.
		Deformación plástica.		Efectuar la boroscopia.	Según los resultados obtenidos del análisis de vibraciones y temperaturas.
	Ejes	Abrasión en los apoyos de los rodamientos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamientos superficiales.</li> <li>• Sobrecargas.</li> <li>• Errores de diseño.</li> <li>• Técnicas de construcción inadecuadas.</li> <li>• Infiltración de fluidos a la máquina.</li> </ul>	Monitoreo de vibraciones.	Cada 10 minutos recoger vibraciones globales y cada una hora realizar análisis espectral (online).
		Agrietamiento.		Comprobar alineación.	Según lo establecido por el fabricante y por cada fallo tres fallos en la red

					eléctrica, debido a frenados bruscos.
		Deformaciones.		Evitar que la velocidad de operación se aproxime o coincida con una de las velocidades críticas (monitoreo de las rpm).	Según el sistema de control (SCADA).
		Fatiga del material.			
		Corrosión.			
Generador	Rodamientos	Descascarillado por fatiga (se producen grietas en la superficie).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debido a fatiga.</li> <li>• Debido a problemas de lubricación (lubricante, cantidad o intervalo de lubricación incorrectos).</li> <li>• Debido a la contaminación (sellos ineficaces).</li> <li>• Debido al montaje incorrecto, a carga más pesada o distinta de la anticipada, a ajustes incorrectos o inadecuados.</li> </ul>	Monitoreo de vibraciones.	Cada 10 minutos recoger vibraciones globales y cada una hora realizar análisis espectral (online).
		Desgaste abrasivo debido a la lubricación inadecuada.		Monitoreo de temperaturas.	Cada 10 minutos recoger valores de temperaturas y compararlas con el patrón establecido (online).
		Corrosión por humedad y por fricción.		Comprobar la alineación.	Según lo establecido por el fabricante y por cada fallo tres fallos en la red eléctrica, debido a frenados bruscos.
		Deformación plástica por sobrecarga.		Comprobar si hay desgaste, daño y fugas en los sellos.	Según los resultados obtenidos del análisis de aceite o grasa, vibraciones y temperaturas.
		Fracturas y agrietamientos.		Aplicar la cantidad correcta de grasa al relubricar.	Según los resultados obtenidos del análisis de vibraciones y temperaturas.
	Estator	Corrosión.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrecalentamiento del embobinado.</li> <li>• Exceso de carga.</li> <li>• Acumulación de partículas.</li> <li>• Soportes rotos.</li> </ul>	Monitoreo de temperaturas.	Cada 10 minutos recoger valores de temperaturas y compararlas con el patrón establecido (online).
		Deformación.		Comprobar que no haya filtración de partículas desde el	Según lo establecido por el

				exterior.	fabricante y sistema de control.
		Desequilibrio de voltaje.		Comprobar el sistema de ventilación para evitar los sobrecalentamientos.	Según lo establecido por el fabricante y sistema de control.
				Realizar una limpieza de los componentes eléctricos.	Según el monitoreo de variables eléctricas, sistema de control y lo establecido por el fabricante.
				Comprobar que el cableado esté en buenas condiciones.	Según el monitoreo de variables eléctricas, sistema de control y lo establecido por el fabricante.
	Rotor	Quiebre de barras y anillos del rotor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación.</li> <li>• Instalación incorrecta.</li> <li>• Rotura de la barra del rotor debido a la fatiga.</li> <li>• Desequilibrio.</li> <li>• Sobrecalentamiento o en el devanado.</li> <li>• Fricción entre el rotor y el estator.</li> </ul>	Monitoreo de vibraciones.	Cada 10 minutos recoger vibraciones globales y cada una hora realizar análisis espectral (online).
		Irregularidades en el entrehierro (excentricidades estáticas y dinámicas).		Monitoreo de temperaturas.	Cada 10 minutos recoger valores de temperaturas y compararlas con el patrón establecido (online).
		Desbalanceos.		Comprobar la alineación.	Según lo establecido por el fabricante y por cada fallo tres fallos en la red eléctrica, debido a frenados bruscos.
				Confirmar el paso de corriente.	Según el monitoreo de variables eléctricas y sistema de control.
				Efectuar una estimación de parámetros	Según el monitoreo de variables eléctricas y sistema de

				electromagnéticos.	control.
--	--	--	--	--------------------	----------

## CONCLUSIONES

En la presente investigación, realizada en el PE Gibara 1, se pudo arribar a las siguientes conclusiones:

1. Se desarrolló la metodología RCM para la multiplicadora y el generador de los aerogeneradores del PE Gibara 1, haciendo un estudio detallado de los elementos que componen estos subsistemas.
2. Se realizó un plan de mantenimiento basado en el RCM para los subsistemas multiplicadora y generador de los aerogeneradores del PE Gibara 1.
3. Se demostró que el lubricante en uso está en condiciones para continuar en servicio, y en cuanto al estado técnico de la máquina se detectaron presencia de partículas de desgaste (hierro) que alertan sobre un posible nivel de deterioro en los engranes y rodamientos de la multiplicadora, que pueden estar provocando las constantes alarmas por altas temperaturas en el equipo.



## RECOMENDACIONES

1. Darle seguimiento al tema de investigación y profundizar más en el mismo.
2. Implementar el RCM en los demás subsistemas de los aerogeneradores del PE Gibara 1.
3. Implementar el plan de mantenimiento propuesto en esta investigación.
4. Que esta investigación sea utilizada como consulta a estudiantes y profesores de la Universidad y a trabajadores del PE Gibara 1.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguinaga-Barragán, Á. (2007). Confiabilidad operacional para la ingeniería del mantenimiento.
- Andrade-Quiroz, R. H. (2020). *Propuesta de la metodología RCM en la gestión de mantenimiento que permita mejorar la disponibilidad de la Línea de Chancado Primario en una empresa minera.*
- Andrade-Vieira, R. J. d. (2013). Evaluación de Indicadores de la Condición de Aerogeneradores.
- Asunción, C. C. d. I. (2012). *Evaluación de estrategias de control de aerogeneradores de alta potencia.*
- Córdova-Pérez, L. M. (2019). *Análisis de criticidad en el sistema hidráulico de los aerogeneradores GOLDWIND S50/750 del Parque Eólico Gibara II.*
- Fragoso-Herrera, S. (2016). *Diseño de sistemas de control multivariable mediante redes de desacoplo: aplicación al control de aerogeneradores.*
- González-Jorge, Y. (2018). *Evaluación de la calidad del mantenimiento en el Policlínico San Andrés en la provincia de Holguín.,*
- Guzmán-Aguilar, A. F. (2017). *Análisis multivariante en parques eólicos.*
- Jiménez-Pariente, C. A. (2016). *ANÁLISIS DE FALLOS DE PARQUES EÓLICOS.*
- Kessler, K.-A. (2019). *Plan de Mantenimiento de un Parque Eólico.*
- Labañino-Fernández, J. E. (2013). *Análisis del Sistema de Mantenimiento del Decorador 6CMPX800 de la Empresa de Envases de Aluminio (ENVAL).*
- Labrada-Castillo, Y. G. (2017). *Estudio de fallos de los Aerogeneradores del Parque Eólico Gibara 1 (GAMESA).*
- Larraya, J. G. P. d. (2014). *Optimización del mantenimiento preventivo de un aerogenerador mediante el diseño de tareas de su fuerza de trabajo.*
- Martín-Mayordomo, C. (2015). *Análisis de la fiabilidad y disponibilidad de los aerogeneradores.*
- Martínez, E. J. M., J. Blanco Fernández, J.C. Sáenz Díez. (2011). Predicción y detección de averías en aerogeneradores a partir de datos SCADA. doi: <http://dx.doi.org/10.6036/ES5708>

- Montilla, C. A. (2007). Caso de aplicación de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM, previa existencia de mantenimiento preventivo.
- Moreno-Carreras, P. A. (2017). *Plan de mantenimiento de un aerogenerador offshore*.
- Orozco-Acosta, G. (2008). *La energía eólica en los sistemas eléctricos de potencia*.
- Pupo-Leyva, H. A. (2017). *Evaluación de los costos de operación y mantenimiento de los parques eólicos de Gibara*.
- Rivero-Rivero, N. C. V. (2018). *Propuesta de implementación de la metodología RCM para la mejora de la gestión del mantenimiento en los equipos auxiliares de una central termoeléctrica*.
- Rodríguez-López, M. Á. (2015). *Metodología para sistemas inteligentes de detección de mal funcionamiento en equipos. Aplicación a los aerogeneradores*.
- Sainz-Carrera, R. (2020). Políticas y Estrategias un Plan de Mantenimiento a Bajo Costo.
- Sánchez, W. S., Vladimir González-Fernández. (2010). Modelo de análisis de cargas máximas en aerogeneradores producidas por vientos extremos. doi:[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59442010000200003](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442010000200003)
- Santos-Ruano, M. D. (2005). *ANÁLISIS PARA LA INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE AEROGENERADORES.*,
- Torres-Sainz, R. (2019). *Evaluación de las causas de fallas y sus soluciones, en la caja multiplicadora del aerogenerador GOLDWIND S50/750 mediante el análisis del árbol de fallas*.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Loría García, A. L. (2016). Diseño de un modelo de toma de decisiones para mantenimiento basado en el monitoreo del deterioro multiestado para un sistema de aerogeneración instalado en Costa Rica.
2. Castro Lozano, C., & Romero Morales, C. (2016). Introducción a SCADA. Interfaz Hombre Máquina. Conferencia.
3. Villa Montoya, L, F. (2011). Mantenimiento predictivo aplicado a máquinas sometidas a velocidad y carga variables mediante análisis de órdenes.
4. Guerra Surós, Y. (2008). Implementación del Sistema del Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (RCM) al sistema de frenos del camión DAF modelo CF 75. 310.
5. Meléndez de la Cruz, E. A. (2019). Evaluación del comportamiento térmico en los aerogeneradores GOLDWIND S50/750 mediante herramientas CAD-CAE.
6. Leyva Ramírez, L. A. (2015). Plan de actividades para minimizar la corrosión en el Parque Eólico Gibara 1.
7. Luque Alcántara, M. P. (2017). Diseño, construcción y control de un aerogenerador de equipo de prácticas de bajo coste.

## ANEXOS



Anexo 1. Aerogenerador Siemens Gamesa (marca española). Fuente: [https://www.google.com/search?q=fotos+de+aerogeneradores+games+e%C3%B3lica&tbm=isch&chips=q:fotos+de+aerogeneradores+games+e%C3%B3lica,online\\_chips:siemens+gamesa&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj7wKGNtOTsAhUQK1kKHXr5A\\_MQ4IYoAHoECAEQFA&biw=1007&bih=640](https://www.google.com/search?q=fotos+de+aerogeneradores+games+e%C3%B3lica&tbm=isch&chips=q:fotos+de+aerogeneradores+games+e%C3%B3lica,online_chips:siemens+gamesa&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwj7wKGNtOTsAhUQK1kKHXr5A_MQ4IYoAHoECAEQFA&biw=1007&bih=640)



Anexo 2. Aerogenerador Vestas. Fuente: <https://ecoinventos.com/turbina-eolica-mas-grande-mundo-cerca-comercializacion/>



Anexo 3. Aerogenerador Gamesa Eólica. Fuente: <https://www.ecoticias.com/energias-renovables/28539/noticias-energias-renovables-verdes-limpas-alternativas-sostenibles-sustentables-eolica-geotermica-solar-termosolar-concentracion-medio-ambiente-medioambiente-medioambiental-ambiental-eficiencia-energetica-definicion-tipos-ventajas-alternativas-paneles-placas-mareomotriz-aerogeneradores>



Anexo 4. Parque Eólico Gibara 1. Fuente:<https://www.evwind.com/2014/10/05/eolica-en-cuba-aporta-mas-de-15-mil-megavatios-en-el-parque-eolico-de-gibara/>