



**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**



Implementación de un sistema de diagnóstico por monitoreo de vibraciones en la caja multiplicadora y el generador para un procedimiento de toma de decisiones por redes neuronales para el aerogenerador g52/850 número 5 del Parque Eólico Los Santos.

Informe de Práctica de Especialidad para optar por Título Ingeniero en  
Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura.

Kenneth Gutiérrez Robles.

Cartago

Noviembre, 2017

**Profesor Asesor**

Ing. Joshua Guzmán Conejo.

**Asesor Industrial**

Ing. Jeffrey Luna Galera.

**Tribunal Examinador**

Ing. Juan Pablo Arias Cartín

Escuela de ingeniería Electromecánica – TEC.

Ing. Manuel Badilla Sánchez

Escuela de ingeniería Electromecánica – TEC.

## Información del estudiante y de la empresa

Nombre: Kenneth Gutiérrez Robles.  
Cedula: 3-0455-0948  
Carnet ITCR: 201036288  
Dirección de residencia en época lectiva: Residencial Angulo segunda etapa, Central, Cartago.  
Dirección de residencia en época no lectiva: 500 mts. oeste de la Escuela de La Angostura de León Cortes Castro, San José, Costa Rica.  
Teléfono en época lectiva: 8913-5697  
Teléfono en época no lectiva: 8913-5698  
Email: [keniyo.gr@gmail.com](mailto:keniyo.gr@gmail.com)  
Fax: N/A

## Información del Proyecto.

Nombre del Proyecto: Implementación De Un Sistema De Diagnóstico Por Monitoreo De Vibraciones En La Caja Multiplicadora Y El Generador Para Un Procedimiento De Toma De Decisiones Por Redes Neuronales.  
Profesor Asesor: Ing. Jeffrey Luna Galera.  
Asesor Industrial: Ing. Joshua Guzmán Conejo.  
Horario de trabajo del estudiante: Lunes a Viernes de 7:00 am a 5:00 pm

## Información de la Empresa.

Nombre: COOPESANTOS R.L.  
Dirección: San Marcos de Tarrazú, San José - Costa Rica.  
Teléfono: (+506) 25462525  
Fax: (+506) 25466173  
Apartado: 003-8065 Tarrazú, San José, Costa Rica.  
Actividad principal: Generación y distribución de energía eléctrica.

## Resumen.

---

En el presente proyecto, se desarrolla la implementación... el prototipo de un sistema de monitoreo de vibraciones para la caja multiplicadora y el generador en el aerogenerador número 5, modelo G52/850 de marca GAMESA del Parque Eólico Los Santos, que además sirva de complemento en la metodología basada en redes neuronales artificiales para la predicción de la vida útil acumulada que se está desarrollando en dicho parque.

Desde noviembre del 2016 la gerencia del Parque Eólico Los Santos inició con la idea ambiciosa de realizar la transición de un mantenimiento correctivo a un mantenimiento basado en condición, para lo cual realizó la apuesta de desarrollar la tecnología de redes neuronales artificiales para la predicción de la vida útil acumulada mediante la ayuda de estudiantes avanzados en ingeniería del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Con el desarrollo de la investigación se encontró la necesidad de un sistema que permitiera la obtención de datos de vibración.

Para comenzar, se procederá a realizar un estudio del equipo que se pretende instalar con el fin de conocer su característica para poder determinar los alcances que se pueden obtener con el mismo. Una vez que se tengan claras las condiciones del equipo se realiza un estudio de los trabajos realizados anteriormente y se procede a realizar análisis en planta para determinar las condiciones presentes al momento de realizar la instalación, así se logra determinar la instalación adecuada, finalmente, se realiza el estudio de los parámetro según la norma ISO 10816, con lo cual se origina el sistema de monitoreo que se instaló.

Finalmente, para logra obtener un sistema de monitoreo de vibraciones con el cual se inicia un proceso de seguimiento para depurar los resultados.

- 1) **Palabras clave:** Mantenimiento basado en condición, Análisis de vibraciones, Desbalance, Desalineación, Aerogenerador, Multiplicadora, Generador.

## Abstract.

---

This project is about the implementation of a prototype of a vibration monitoring system for the gear box and the generator in the wind turbine number 5, model G52 / 850, GAMESA brand, located in Los Santos Wind Farm, which is also intended to work as a complement in the methodology based on artificial neuronal networks to predict the accumulated useful life, currently being developed in this wind farm.

Since November 2016, the management department of the Los Santos Wind Farm started with the ambitious idea of performing a transition from a corrective maintenance to a maintenance based on condition, so the commitment was made to develop the artificial neuronal networks to predict the accumulated useful life with the help of advanced students of engineering from the Instituto Tecnológico de Costa Rica (Technological Institute of Costa Rica). The need to elaborate a system that allows the gathering of vibration data was found thanks to the development of this investigation.

To begin with, the equipment which is intended to be installed will be analyzed in order to know its characteristics and the scope we can obtain from it. Once we define the condition of the equipment, a study of the previous works and an analysis of the plant will be carried out to determine their present conditions to perform a proper installation. Finally, the study of the parameters according to the norm ISO 10816 is made with the objective of starting the installed monitoring system.

To conclude, we will obtain a vibrations monitoring system which starts a follow up process with the objective to refine the results

**Key words:** Maintenance based on condition, Vibration analysis, unbalance, Misalignment, Wind turbine, Multiplier, Generator

.

## Acrónimos.

---

**ANN:** Redes Neuronales Artificiales.

**CBM:** Mantenimiento basado en condiciones.

**COOPESANTOS:** Cooperativa de Electrificación Rural Los Santos.

**DAS:** Sistema de adquisición de datos

**DITEM:** División de transformadores y equipos de mediana tensión.

**FFT:** Transformada rápida de Fourier.

**IP:** Protocolo de Internet

**MBTS:** Muy bajas tensiones de seguridad.

**PC:** Computadora

**PLC:** Controlador lógico programable.

**SMP:** Sistema de Mantenimiento Preventivo de Gamesa.

## Dedicatoria.

---

A mi Padre, Juan Bautista Gutiérrez Mora, a mi madre Luz Mari Robles Gamboa y hermana Irene Teresita Gutiérrez Robles, quienes a pesar del tiempo, siempre han mostrado su cariño y apoyo, realizando sacrificios para que nada me faltara y así lograra cumplir una de mis más importantes metas.

Además, dedico este proyecto a todas las demás personas que han formado parte del proceso formativo personal y profesionalmente, que son parte del camino que me llevó a la culminación de mi etapa educativa.

## Agradecimientos.

---

Gracias a Dios, por brindarme la fuerza, la capacidad y la seguridad para concluir este proyecto con éxito, superando mis expectativas y cumpliendo una meta más en mi vida.

A los compañeros y profesores del TEC, quienes influenciaron en mi formación profesional.

Al Ing. Jeffrey Luna, por darme la oportunidad para desarrollarme en una gran área de la Ingeniería, al Ing. Ólger Robles por su apoyo y guía, al asistente de Ingeniería Braulio Moya por su disposición para ayudarme en cualquier momento, y a todos los compañeros de COOPESANTOS por recibirme como uno de ellos y por su disposición para colaborar en lo que les fuera posible.

## Tabla de contenido

---

Resumen.....	iii
Abstract.....	v
Acrónimos.....	vi
Dedicatoria.....	vii
Agradecimientos.....	viii
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Reseña de la empresa.....	1
1.1.1 Misión.....	2
1.1.2 Visión.....	2
1.2 Descripción del proceso.....	2
1.3 Situación Actual.....	3
CAPÍTULO 2: Planteamiento del Proyecto.....	7
2.1 Objetivos Del Proyecto.....	7
2.1.1 Objetivo General.....	7
2.1.2 Objetivo específico.....	7
2.2 Metodología.....	8
2.3 Viabilidad.....	11
2.4 Justificación.....	11
2.5 Alcances.....	13
CAPÍTULO 3: Marco Conceptual.....	14
3.1 Variables aleatorias.....	14
3.2 Estrategias de Mantenimiento.....	14
3.3 Mantenimiento basado en condición.....	15

3.4 Mantenimiento predictivo. ....	16
3.5 Mantenimiento predictivo frente a los otros tipos de mantenimiento.....	18
3.6 Análisis de vibraciones.....	18
3.7 Sistemas binarios y multi-estados.....	22
3.8 Aerogeneradores. ....	26
3.9 Elementos de en Aerogenerador. ....	27
3.10 Rotor. ....	27
3.11 Multiplicadora. ....	29
3.12 Sistemas de Frenos. ....	30
3.13 Generador. ....	31
3.14 Sistemas auxiliares. ....	32
3.15 Sistema de orientación.....	33
CAPÍTULO 4: Desarrollo. ....	34
4.1 Análisis del equipo de monitoreo de vibraciones y elementos que lo componen. ....	34
4.1.1 Electrónica de diagnóstico. ....	36
4.1.2 Acelerómetros.....	45
4.1.3 Conector hembra EVC 651 .....	48
4.1.4 Software de parametrización VES004. ....	51
4.2 Puntos de instalación de los acelerómetros. ....	52
4.3 Instalación de los Acelerómetros. ....	58
4.4 Comunicación del sistema de monitoreo de vibraciones. ....	69
4.5 Parametrización de la medición. ....	71
4.6 Puesta en marcha de los equipos de monitoreo de vibración. ....	77

4.7 Análisis Financiero.....	82
4.8 Resultados .....	86
CAPÍTULO 5: Finalización.....	90
5.1 Conclusiones.....	90
5.2 Recomendaciones. ....	91
CAPÍTULO 6: Anexos. ....	92
6.1 Orden de compra de sistema de monitoreo. ....	92
6.2 Orden de compra para el kit de adhesivos.....	93
6.3 Orden de compra para la bases para montaje de Acelerómetros.....	94
6.4 Reportes de no producción de energía durante la instalación de los Acelerómetros.....	95
6.5 Lista de comprobación visual de equipo de monitoreo de vibraciones. ....	97
6.6 Pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo y software de monitoreo .....	98
6.7 Pruebas conde adhesivo AA 312 y activador SF 376 loctite.....	113
6.8 Lista de check de corroboración de materiales .....	117
6.9 Calculo de costo de mano de obra para la instalación.....	118
CAPÍTULO 7: Bibliografía.....	121

## Índice De Figuras

---

Figura 1.1. Zona de concesión de CoopeSantos. R.L.....	1
Figura 1.2. Topología de la ANN para el Generador. ....	5
Figura 1.3. Topología de la ANN para la Caja Multiplicadora.....	6
Figura 2.1 Distribución de costo de mantenimiento para el aerogenerador número 5 .....	11
Figura 3.1 Variación del estado de un componente en función del tiempo según la estrategia de mantenimiento. ....	15
Figura 3.2 Gráfico de T-P del mantenimiento.....	16
Figura 3.3 Diagrama de bañera para la vida de los elementos. ....	17
Figura 3.4 Ejemplo de configuración para el monitoreo de condición mediante el análisis de vibraciones .....	20
Figura 3.5 Representación de Sistema Binario .....	22
Figura 3.6 Representación de Sistema Multi-estado.....	23
Figura 3.7 Partes de una Neurona humana .....	24
Figura 3.8 Elementos de una red neuronal artificial .....	25
Figura 3.9. Aerogeneradores de eje horizontal de tres palas, Parque Eólico Los Santos. ....	26
Figura 3.10. Principales partes de un Aerogenerador. ....	27
Figura 3.11. Modelo de la sección transversal de palas de un aerogenerador. ....	28
Figura 3.12. Bujes de tipo Rígido, Abisagrado y Basculante.....	29
Figura 3.13. Caja multiplicadora.....	30
Figura 3.14. Representación de un freno de disco.....	31
Figura 3.15. Sistema de Orientación.....	33

Figura 4.1 Diagrama de comunicación del sistema de monitoreo de vibraciones.	35
Figura 4.2. Electrónica VSA 100 .....	36
Figura 4.3: Diagrama de conexión de electrónica VSE 100.....	40
Figura 4.4 Ubicación de led de alarmas.....	43
Figura 4.5. Esquema de las dimensiones de la unidad AVE 100.....	45
Figura 4.6 Acelerómetro VSA 001.....	46
Figura 4.7 Distribución de la conexión de acelerómetro.....	46
Figura 4.8 Diagrama de acelerómetros.....	47
Figura 4.9 Cable con conector hembra de 15 metros.....	49
Figura 4.10 Carátula del software VES004 .....	52
Figura 4.11 Posición de los Acelerómetros del sistema de monitoreo.....	53
Figura 4.12 Representación de los costó de mantenimiento por sistema.....	54
Figura 4.13 Posición de los acelerómetros según ISO 10816.....	56
Figura 4.14 Direcciones de medición seleccionadas.....	57
Figura 4.15 Ubicación de los Acelerómetros los elementos del aerogenerador....	57
Figura 4.16 Geometría de las bases para la instalación de Acelerómetros.....	60
Figura 4.17 Bases para Acelerómetros de acero inoxidable 302.....	61
Figura 4.18 Adhesivo AA 330 y Activador SF 7388 Loctite.....	62
<i>Figura 4.19 Velocidad de curado según el sustrato adhesivo AA 330 loctite.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.20 Velocidad de curado según la holgura para el adhesivo AA 330 loctite.</i> .....	<i>64</i>
<i>Figura 4.21 Envejecimiento térmico del adhesivo AA 330 loctite.....</i>	<i>64</i>
Figura 4.22 Adhesivo AA 312 y activador SF 376 loctite.....	66
Figura 4.23 Velocidad de curado según el sustrato adhesivo AA 312 loctite.....	67

Figura 4.24 Envejecimiento térmico del adhesivo AA 312 loctite. .... 68

Figura 4.25 Limpiador SF 7039 de loctite..... 68

Figura 4.26 Gabinete Top de aerogenerador número 5. .... 70

Figura 4.27 Switch eds-308-mm-st de marca MOXA ..... 71

Figura 4.28 *Gabinete Ground de aerogenerador número 5.* ..... 75

Figura 4.29 *Receptor PEL -MC-10/100 SMSC—EU.* ..... 76

Figura 4.30 Computador industrial N-Tron 306FXE2-N-ST-15..... 77

Figura 4.31 Captura de Pantalla de la pantalla de documentación. .... 79

Figura 4.32 Configuración de dos electrónicas de monitoreo en un solo proyecto.  
..... 80

Figura 4.33 Muestra de programación de las frecuencia de para los  
acelerómetros..... 81

Figura 4.34 Muestra de programación de los objetos para los acelerómetros. .... 81

Figura 4.35 Gráfico de líneas de los datos en bruto de los acelerómetros..... 86

Figura 4.36 Visualización del comportamiento de vibración de los elementos  
sensados. .... 87

Figura 4.37 Espectro de medición de acelerómetro SMBX..... 88

Figura 4.38 Representación de los datos históricos del acelerómetro SCY..... 88

Figura 4.39 Ejemplo de la presentación de los informes de histora. .... 89

Figura 6.1 Lista de Cheque del equipo de monitoreo..... 97

Figura 6.2 Representación del icono de acceso del software efector octavis. .... 98

Figura 6.3 Captura de Pantalla de la presentación de la interface introductoria del  
software efector octavis..... 99

Figura 6.4 Selección de las electrónicas de monitoreo para la puesta en marcha.  
..... 100

Figura 6.5 Nombramiento del proyecto ..... 100

Figura 6.6 Características del equipo e inicio de configuración del proyecto. .... 101

Figura 6.7 Configuración de la dirección IP de la electrónicas de monitoreo. .... 102

Figura 6.8 Selección de la dirección IP del equipo donde se realizará el análisis.  
..... 102

Figura 6.9 Ventana de acciones del equipos de monitoreo..... 103

Figura 6.10 Creación de niveles de seguridad para los deferentes usuarios. .... 104

Figura 6.11 Generación de niveles de permiso para el diferente usuario creados.  
..... 104

Figura 6.12 Ventana de comprobación para la comunicación entre la computadora  
y las electrónicas de monitoreo. .... 105

Figura 6.13 Reacción de la electrónica de monitoreo para corroboración de  
comunicación. .... 105

Figura 6.14 Habilidad de entradas digitales para la toma de mediciones. .... 106

Figura 6.15 Selección de tipo de Acelerómetros que se emplearán. .... 107

Figura 6.16 Establecimiento de objetos. .... 107

Figura 6.17 Selección del tipo de objeto que se desea implementar. .... 108

Figura 6.18 Selección de los Acelerómetros que se desean implementar en el  
objeto. .... 108

Figura 6.19 Designación del nombre del objeto. .... 109

Figura 6.20 Selección de los rangos de medición de los objetos. .... 109

Figura 6.21 Definición del Trigger. .... 110

Figura 6.22 Definición de las alarmas para las mediciones. .... 110

Figura 6.23 Presentación del objeto configurado. .... 111

Figura 6.24 Presentación del espectro de la toma de datos. .... 112

Figura 6.25 Representación gráfica de los datos brutos de la medición. ....	112
Figura 6.26 Presentación de la historia de los datos. ....	113
<i>Figura 6.27 Láminas de pruebas para el adhesivo AA312 y activador SF 376 loctite. ....</i>	<i>114</i>
Figura 6.28 Distribución del adhesivo en la lámina de acero 1020. ....	115
Figura 6.29 Láminas unidas mediante adhesivo AA 312 loctite. ....	116

## Índice-de-gráficas-y-Tablas

Gráfico 4.1. Distribución de inversión del mantenimiento correctivo vrs el preventivo, período 2015-2017.....	54
Gráfico 4.2 Distribución de gastos de mantenimientos correctivos para aerogenerador número 5.....	55
Gráfico 4.3 Control de generación del parque Eólico Los Santos .....	85
Tabla 1.1. Características de los Aerogeneradores Proyecto Eólico Los Santos....	3
Tabla 3.1 Valores de referencia para turbinas eólicas Onshore con salida nominales menores o iguales a 3 MW .....	21
Tabla 4.1. Tabla de descripción de las terminales de conexión. ....	41
Tabla 4.2 Descripción de significado de los led de la electrónica VSE 100 .....	44
Tabla 4.3 Datos técnicos de los acelerómetros.....	47
Tabla 4.4 Características del Cable con conector hembra. ....	50
Tabla 4.5 Simbología implementada para la denotación de los Acelerómetros. ...	58
Tabla 4.6 Presentación de adhesivos híbridos HY 4060 GY y HY4070 .....	69
Tabla 4.7 Resumen de valores para la configuración de alarmas y frecuencia para los sensores. ....	74
Tabla 4.8 Número Mac de las electrónicas y acelerómetros asociados a cada una de ellas. ....	78
Tabla 4.9 Gastos asociados a la Instalación del Sistema de Monitoreo de Vibración. ....	82
Tabla 4.10 Descripción de índices para el cálculo del costo de MBC. ....	84
Tabla 6.1 Lista de materiales. ....	117

Tabla 6.2 Lista de control de tiempo y cantidad de personal para la instalación de las bases y cableado..... 118

Tabla 6.3 Lista de control de tiempo y cantidad de personal para la instalación del acelerómetro y pruebas de comunicación..... 120

## CAPÍTULO 1: Introducción

---

En el actual capítulo se presentan los detalles del lugar donde fue desarrollado el presente proyecto, así mismo, los objetivos de éste, motivación, metodología, alcances y limitaciones.

### 1.1 Reseña de la empresa.

Fue fundada en San Cristóbal Norte de Desamparados el 17 de enero de 1965, la Cooperativa de Electrificación Rural Los Santos (COOPESANTOS R.L.) opera a través de sus cuatro líneas de negocio: Distribución de energía, Generación de energía, Info-comunicaciones y DITEM (División de transformadores y equipos de mediana tensión).

Actualmente, COOPESANTOS presta dichos servicios en una región de concesión de aproximadamente 1500 Km<sup>2</sup> con lo cual provee el servicio eléctrico a nueve cantones de las provincias de San José y Cartago, ofreciendo un 99.8% de la población servida, generando así empleo directo a más de 160 personas.



Figura 1.1. Zona de concesión de COOPESANTOS. R.L.  
**Fuente:** COOPESANTOS (2017)

### 1.1.1 Misión

Somos una empresa cooperativa que brinda a nuestros asociados y clientes, bienes y servicios de energía e Info-comunicaciones en forma personalizada, conformados por un equipo de trabajo innovador, que se orienta en los valores de integridad, responsabilidad y solidaridad, impulsando el bienestar social en armonía con la naturaleza.

### 1.1.2 Visión

Ser líderes en servicios eficientes y personalizados de energía, info-comunicaciones y otros, para contribuir con el bienestar y desarrollo de nuestros asociados, usuarios y región de influencia.

## 1.2 Descripción del proceso.

Actualmente COOPESANTOS R.L., contempla cuatro líneas de negocios: Distribución de energía, Generación de energía, Info-comunicaciones y DITEM. En lo que respecta a generación eléctrica cuenta con el parque Eólico Los Santos.

El proyecto Eólico Los Santos, fue inaugurado en octubre del año 2011, con 15 aerogeneradores Marca GAMESA, cuyas características se presentan en la Tabla 1. Se ubica sobre la Interamericana Sur, entre Casa Mata de Desamparados y La Paz de El Guarco, está a sólo 45 minutos del centro de la capital, para los cuales se requieren vientos de más de 10 m/s, provenientes del noreste y suroeste del país, por lo cual estos sitios son catalogados como clase “A” para la generación de energía eléctrica a partir de la energía eólica (COOPESANTOS, 2016).

Tabla 1.1. Características de los Aerogeneradores Proyecto Eólico Los Santos

<b>Marca</b>	<b>Gamesa Eólica</b>
<b>Modelo</b>	G51.850 kw
<b>Altura de la torre</b>	44 metros
<b>Longitud aspas</b>	25.3 metros
<b>Diámetro del rotor</b>	52 metros
<b>Distancia entre las torres</b>	100 metros

**Fuente:** (COOPESANTOS, 2016).

Se debe mencionar, que la incorporación de este parque Eólico, COOPESANTOS sustituyó un 30% de la compra de Energía al ICE.

### 1.3 Situación Actual.

En la actualidad COOPESANTOS, en lo referente a la línea de negocios de generación, cuenta con un parque eólico de 15 unidades de marca GAMESA G52-850 kW, las cuentan con el Sistema de Mantenimiento Preventivo de Gamesa (SMP) el cual corresponde al equipo para la toma y análisis de vibraciones. Dada la finalización del contrato de concesión con la empresa hace tres años, los datos

de monitoreo de vibraciones no se ha llevado a cabo por motivo de que la licencia tiene un costo aproximado de 1000 dólares por unidad el cual implicaría un aumento en los costos de producción del Parque Eólico, por dicha razón el departamento de mantenimiento y operación del proyecto eólico, decidió realizar la implementación de un programa de investigación y desarrollo de tecnología, con lo cual realizar las labores de monitoreo con tecnología propia y personal nacional.

Con motivo de solventar esta necesidad se plantea la implementación de un sistema ANN (Redes Neuronales Artificiales), para lo cual se ha planteado técnica de etapas para llevarlo a cabo, las cuales se han realizado por medio de proyectos de graduación de estudiantes del Instituto Tecnológico de Costa Rica de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, grado licenciatura. Debido a lo cual, se han desarrollado dos prácticas, las cuales llevaron por nombre: *“Desarrollo de la estructura necesaria para la implementación de un modelo de toma de decisiones para mantenimiento basado en el deterioro multi-estado para el Parque Eólico Los Santos”* por parte del Ingeniero Bryan Gerardo Bogantes Barrantes. Posteriormente, la Ingeniera Mauren Ríos Ledezma realizó su práctica profesional llevando como título: *“Diseño de una metodología basada en redes neuronales artificiales para la predicción de vida útil acumulada del sistema hidráulico de un aerogenerador g52/850 instalado en el Parque Eólico Los Santos”*.

Siguiendo con esta metodología para el desarrollo del proyecto planteado por la Cooperativa, se confrontó con el problema que para la implementación de estructura del modelo planteado por el Ingeniero Bryan Bogantes Barrantes, para el análisis la caja multiplicadora y el generador, no se contaba con los datos ni la estructura instalada para la tomas de los mismos en las unidades generadoras, para las variables de vibraciones.

Para el generador el Ingeniero Bryan Bogantes Barrantes, propone el monitoreo de condición mediante las siguientes variables:

- 1) Acelerómetro Axial ( $A_x$ )
- 2) Acelerómetro horizontal ( $A_h$ )
- 3) Temperatura de devanados del generador ( $T_d$ )
- 4) Temperatura del rodamiento del lado de acople ( $TRa$ )
- 5) Temperatura del rodamiento del lado opuesto al de acople ( $TRlo$ )
- 6) Tensión de Línea 1 ( $V1$ )
- 7) Tensión de Línea 2 ( $V2$ )
- 8) Tensión de Línea 3 ( $V3$ )

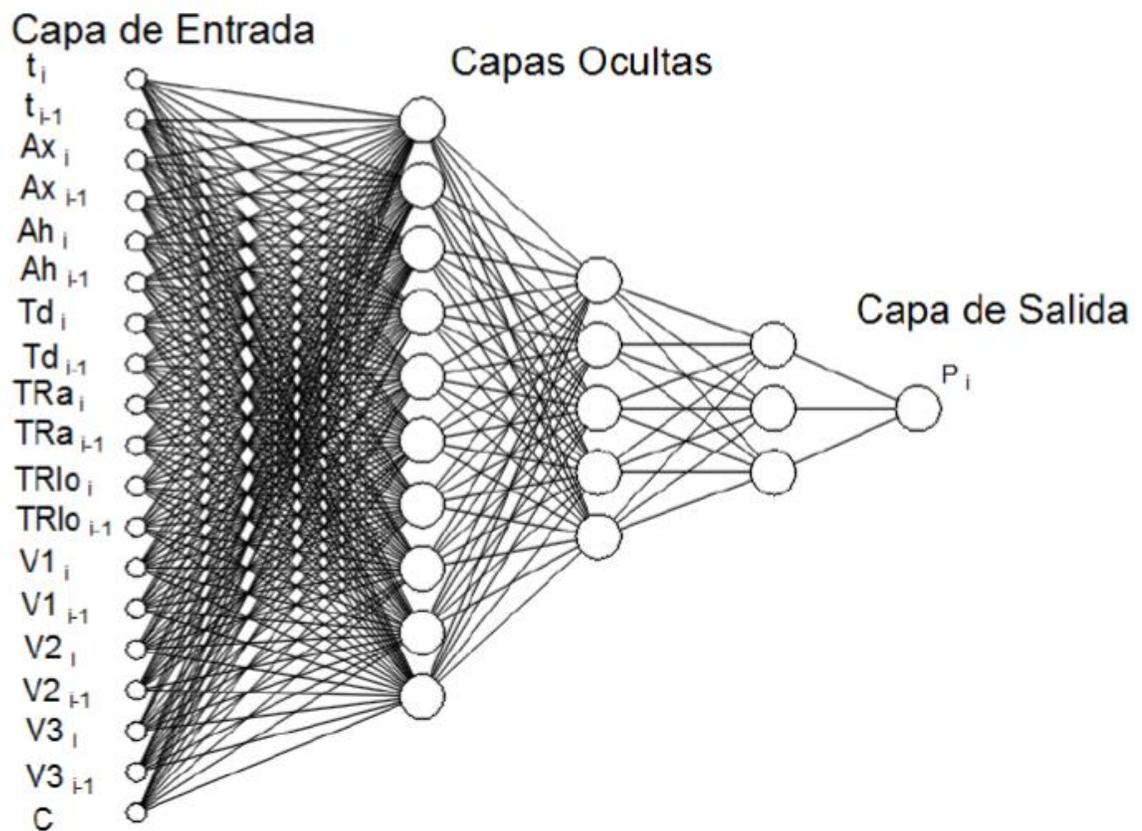


Figura 1.2. Topología de la ANN para el Generador.

**Fuente:**(Bogantes, 1017).

Para la multiplicadora, el Ingeniero Bryan Bogantes Barrantes, son propuestas las siguientes variables:

- 1) Temperatura de rodamiento de la caja multiplicadora ( $TR$ )

- 2) El acelerómetro en posición axial ( $A_x$ )
- 3) Acelerómetro en posición horizontal ( $A_h$ )
- 4) Temperatura de Aceite Multiplicadora ( $T_a$ )

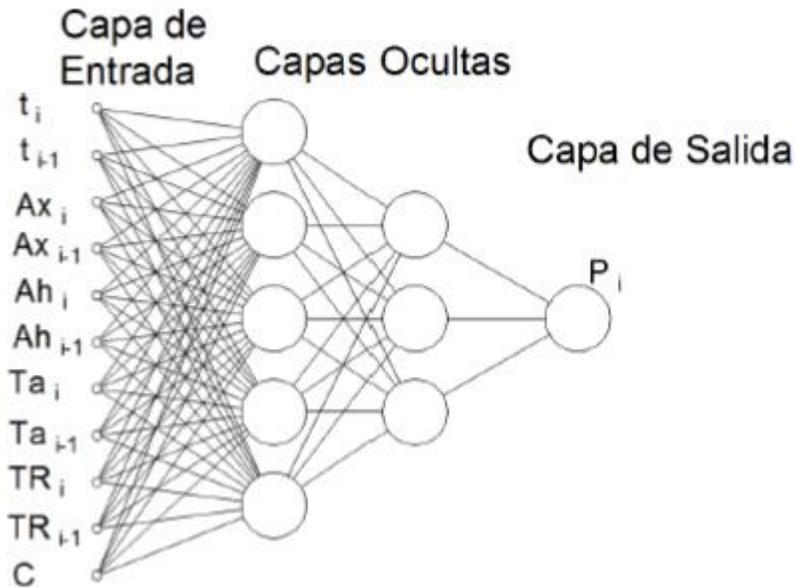


Figura 1.3. Topología de la ANN para la Caja Multiplicadora

**Fuente:** (Bogantes, 1017).

Para posteriormente, realizar el diseño de una metodología basada en redes neuronales artificiales para la predicción de vida útil acumulada emulando al propuesto por la Ingeniera Mauren Ríos Ledezma para el sistema hidráulico, pero para el caso del análisis de vibraciones de la caja multiplicadora y generador, por lo cual se ve en la necesidad de realizar la licitación, compra, implementación y monitoreo de los equipos que lleven a cabo la medición de vibración para el aerogenerador número 5 del parque eólico. El equipo que se instalará tiene un costo de aproximadamente 5,300 dólares, más los costos de las labores de instalación y pruebas de funcionamiento que se realizará con los recursos de la cooperativa.

## CAPÍTULO 2: Planteamiento del Proyecto

---

### 2.1 Objetivos del Proyecto.

#### 2.1.1 Objetivo General

Implementar un sistema de diagnóstico por monitoreo de vibraciones en la caja multiplicadora y el generador para un sistema de toma de decisiones por redes neuronales para el aerogenerador G52/850 número 5 del Parque Eólico Los Santos.

#### 2.1.2 Objetivos específicos

- 1) Determinar la ubicación de los equipos de monitoreo de vibraciones para la caja multiplicadora y el generador aerogenerador G52/850 número 5 del parque eólico los Santos.
- 2) Establecer los protocolos de comunicación de los elementos de monitoreo y los equipos almacenaje de los datos generados por los dispositivos que conforman el sistema instalado, mediante un estudio del flujo de datos.
- 3) Realizar el análisis de la condición del generador y la caja multiplicadora basado en datos de vibración obtenidos mediante el equipo de monitoreo instalado, basado en la norma ISO 10816-21.
- 4) Calcular los costos asociados a la instalación y monitoreo de un sistema de análisis de vibraciones en la caja multiplicadora y el generador, con la implementación de listas checo para las labores que se debe de llevar acabo.

## 2.2 Metodología.

En este apartado se desarrolla las etapas que deben de implementar para la realización del proyecto, así como las actividades que se asocian a cada una de las etapas.

<b>ETAPA</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>ACTIVIDADES</b>
1 .Estudio y análisis de los trabajos de investigación realizados de redes neuronales.	Conocer los trabajos realizados en redes neuronales y los alcances alcanzados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Analizar los trabajos realizados por el Ingeniero Bryan Gerardo Bogantes Barrantes y la Ingeniera Mauren Ríos Ledezma.</li> <li>○ Realizar una recopilación de información sobre temas asociados que puedan ser de interés.</li> <li>○ Catalogar la información recopilada y seleccionar la que sirva de aporte para la implementación.</li> <li>○ Entrevista con el Ingeniero a cargo del departamento de mantenimiento para logra sustraer cualquier información que pueda influenciar en el desarrollo del proyecto.</li> </ul>
2. Evaluación del equipo que se instalará en la caja multiplicadora y generador.	Estudiar la topología asociada de los equipos que se instalarán.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Estudiar el manual suministrado por el proveedor para conocer las características estructurales y funcionamientos de los equipos.</li> <li>○ Investigar las consideraciones que se deben de tomar en cuenta al instalar este equipo o similares, así como los</li> </ul>

		efectos de una inadecuada instalación.
3. Evaluación de las condiciones en el sitio para la instalación de los equipos.	Determinar las condiciones con las que se encuentran en el sitio, en el cual se colocarán los equipos de monitoreo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Coordinar una visita al aerogenerador número 5, con el encargado de la gestión de mantenimiento.</li> <li>○ Generar un listado con las actividades necesaria para la instalación con base en las operaciones realizados en la visita.</li> <li>○ Estudio de las consideraciones que se deben de llevar, en cuenta en el momento que se realizará la instalación de los equipos.</li> </ul>
4. Estudio de las formas de comunicación de los equipos y mecanismos de almacenamiento de los datos.	Determinar los protocolos de almacenamiento y comunicación de datos que se generarán.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Reunión con el encargado de técnicos de mantenimiento a fin de informarse de los protocolos de información que se emplean en los servidores.</li> <li>○ Estudiar sobre sistemas de almacenamiento de información.</li> <li>○ Definir el tamaño de la base dentro del servidor, el tiempo de almacenamiento, además de los protocolos de respaldo necesarios.</li> </ul>
5. Instalación, puesta en marcha y pruebas de funcionamiento de los equipos instalados.	Instalar los equipos necesarios para realizar un monitoreo de condición mediante vibraciones en el aerogenerador número 5 del parque Eólico los Santos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Realizar el estudio y coordinación de los recursos necesarios para la instalación de los equipos.</li> <li>○ Coordinar visita al aerogenerador número 5.</li> <li>○ Instalación y alambrado de los equipos que se utilizarán.</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Pruebas de funcionamiento y recolección de datos por parte de los equipos.</li> </ul>
<p>6. Cálculo de costos asociados a la instalación de un sistema de monitoreo de vibración.</p>	<p>Determinar los costos totales de implementación del sistema de monitoreo de vibraciones para la caja multiplicadora y generador, de aerogenerador número 5.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ De la lista generada en las actividades de instalación de los equipos, calcular el costo de los tiempos necesarios de realización.</li> <li>○ Analizar los datos de producción del aerogenerador, que pueda utilizar para ver las tendencias de generación y las épocas de mayor efectividad de la misma.</li> <li>○ Del análisis realizado calcular en horas de producción, la cantidad de energía que se debe de producir para justificar la inversión del sistema de monitoreo de vibraciones.</li> </ul>
<p>7. Definir los valores máximos permitidos de monitoreo.</p>	<p>Establecer el espectro de operación de la caja multiplicadora y del generador.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Investigar acerca del diagnóstico e interpretación de resultados que brinda un sistema de monitoreo de vibraciones.</li> <li>○ Analizar el modelo y la norma ISO 10816-21.</li> <li>○ Reunión con el Ingeniero a cargo para definir los parámetros de operación adecuados para los sistemas.</li> <li>○ Realizar un análisis preliminar de los resultados obtenidos en la mediciones a la largo del tiempo en lo que ha sido implementado el sistema.</li> </ul>

### 2.3 Viabilidad.

Para llevar a cabo la implementación del proyecto propuesto se toma como base los trabajos de investigación del Ing. Bryan Bogantes Barrantes, que se realizó para dichos generadores, además de los recursos de la organización, como los servidores de almacenamiento de información, personal de mantenimiento, los cuales implicarían una inversión mínima por parte de la cooperativa para la puesta en marcha de un sistema de monitoreo de vibraciones propios para la caja multiplicadora y el generador.

### 2.4 Justificación.

El Parque Eólico Los Santos está en operación desde hace 5 años, desde hace 3 años el mantenimiento y operación fue asumido por la cooperativa con mano de obra nacional.

Desde que COOPESANTOS asumió la administración del parque eólico presenta el siguiente gráfico los costos donde el mantenimiento correctivo para el aerogenerador número supera ampliamente los que corresponde a los demás tipos de mantenimientos. Distribución de costos de mantenimiento para el aerogenerador número 5.

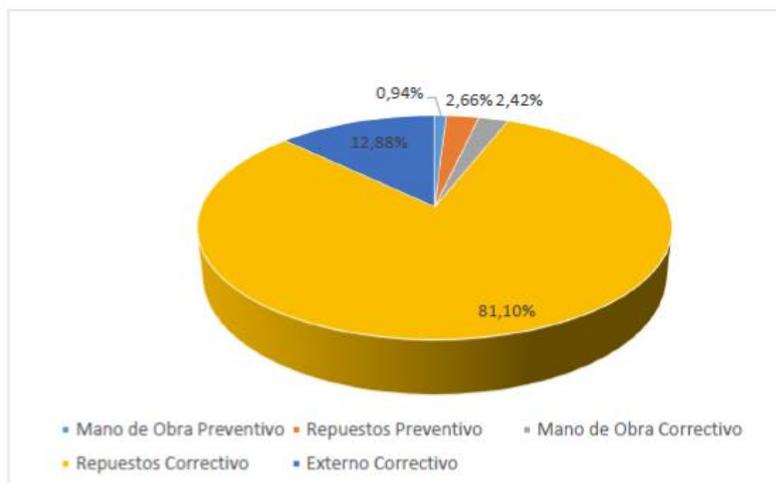


Figura 2.1 Distribución del costo de mantenimiento para el aerogenerador número 5

Fuente:(Ríos Ledezma, 2017).

Actualmente el aerogenerador cuenta con el sistema de Mantenimiento Predictivo de Gamesa (SMP), para el cual actualmente no se tiene acceso a la información porque no se adquirió la licencia del fabricante para acceder a los datos del programa. Además la información que suministraba consiste en dos reportes anuales los cuales presentan la condición del equipo actualmente, pero no permite realizar el monitoreo de la condición en momento real del comportamiento de los elementos de interés.

Se debe de saber la importancia que tiene tener un monitoreo en tiempo real de las vibraciones en el campo del mantenimiento ya que dentro de sus ventajas se pueden citar:

- 1) Luego de realizar labores que implique el desmonte de elementos que se están monitoreando, se puede determinar durante los protocolos de puesta en marcha si hubo una alguna alteración a las operaciones óptimas del elemento después del re-ensamble del equipo.
- 2) Permite determinar si un elemento está funcionando de forma anormal de manera que nos permita realizar las acciones pertinentes, para evitar que un desperfecto se propague a otros elementos de la caja multiplicadora o generador.
- 3) El análisis en vibraciones permite identificar el tipo de avería que se presenta en los sistemas permitiendo disminuir los tiempos que se tarda en identificar que elemento es el que causo las fallas y por ende el tiempo que el aerogenerador esta fuera de servicio.

Otro punto muy importante se debe a la postura organizacional de la cooperativa con respecto a la operación y mantenimiento, esta postura consiste en tener autonomía organizacional, la cual no se tendría si se requiere de una tercerización de las labores de monitoreo de la condición de la caja multiplicadora y el generador.

## 2.5 Alcances.

Se pretende la implementación del sistema de monitoreo de vibraciones para el aerogenerador número 5 de marca GAMESA, contemplando comunicación y almacenaje de los datos, además de generar un análisis preliminar del estado del equipo.

## CAPÍTULO 3: Marco Conceptual

---

### 3.1 Variables aleatorias.

Como es definido por Acuña (2003): “Una variable aleatoria es una variable cuya ocurrencia depende única y exclusivamente al azar” Kuo & Zuo (2003), lo definen como que en diversas aplicaciones son involucrados resultados inciertos y que el interés radica solamente en cierto aspecto del resultado. Por ejemplo: qué número aparecerá cuando sea un dado tirado o cual será el número total cuando sea tirado un par de dados. La variable aleatoria  $X$ , corresponde a la función que es asignada a cada resultado en un espacio muestra  $S$  con un valor real. Se utiliza letra mayúscula para indicar una variable aleatoria y letra minúscula para indicar un valor específico que la variable aleatoria pueda tomar. Las variables aleatorias pueden ser divididas en dos categorías: variables aleatorias discretas y variables aleatorias continuas. Una variable aleatoria discreta puede tomar valores finitos o infinitos numerables. Mientras, que la variable aleatoria continua puede tomar valores en una escala continua, como en el intervalo  $(-\infty, \infty)$ .

### 3.2 Estrategias de Mantenimiento.

Normalmente, al hablar de estrategias de mantenimiento es posible hablar de tres, mantenimiento: correctivo, preventivo y el basado en condición o predictivo. En la Figura 3.1 se muestran un posible escenario de mantenimiento. Esta muestra que el mantenimiento preventivo es realizado más frecuentemente que el mantenimiento basado en condición. Además, es posible observar que mediante el mantenimiento preventivo se desaprovecha mayormente la vida útil del componente al realizar cambios periódicos, mientras que el mantenimiento basado en condición se aprovecha la condición de una mejor manera.

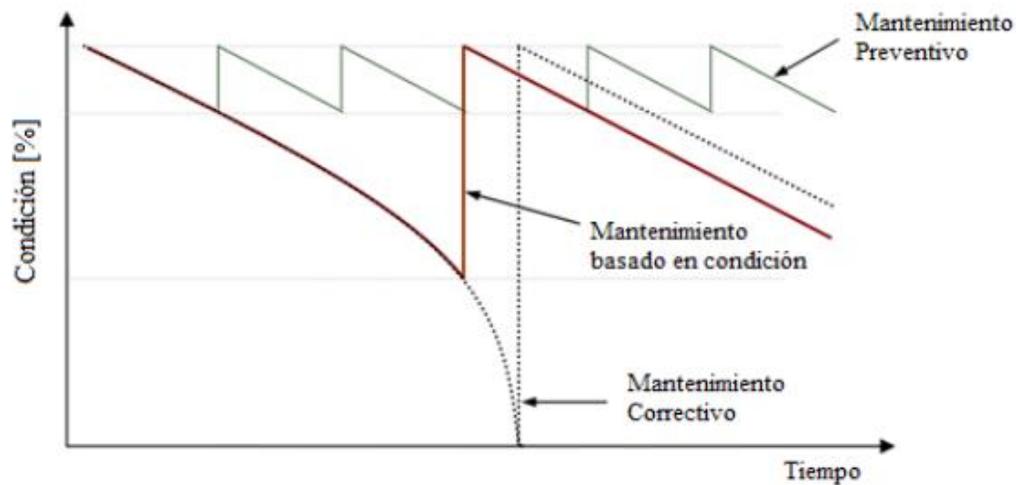


Figura 3.1 Variación del estado de un componente en función del tiempo según la estrategia de mantenimiento.

**Fuente:** Ribrant (2006).

### 3.3 Mantenimiento basado en condición.

El Mantenimiento basado en condición (CBM, por sus siglas en inglés condition-based maintenance) corresponde a un tipo de mantenimiento preventivo, con la diferencia que es basado en el rendimiento y monitoreo de parámetros del sistema; por lo que el mantenimiento iniciará cuando una variable de condición alcance o traspase un valor umbral (Ribrant, 2006). Algunos ejemplos de variables de condición, pueden ser mencionadas: vibración, temperatura, número de partículas en aceite, entre otras. La capacidad de monitorear la condición de los componentes, permitirá facilitar la planeación en función de las fallas y permitirá disminuir los tiempos de paro y los costos asociados. Esto posibilita utilizar los componentes hasta cerca del final de su vida útil, ayudando al manejo de repuestos. Otra de las ventajas de esta estrategia de mantenimiento, radica en la obtención de tendencias y datos estadísticos como el tiempo medio hasta la falla, lo cual es importante para contar información confiable durante el tiempo de vida

del componente (Ribrant, 2006). De las técnicas predictivas utilizadas en este tipo de mantenimiento, se pueden mencionar principalmente el análisis de vibraciones, mediciones de temperatura, monitoreo de aceite, termo-grafía, monitoreo del desempeño, ultrasonido pasivo e inspección visual.

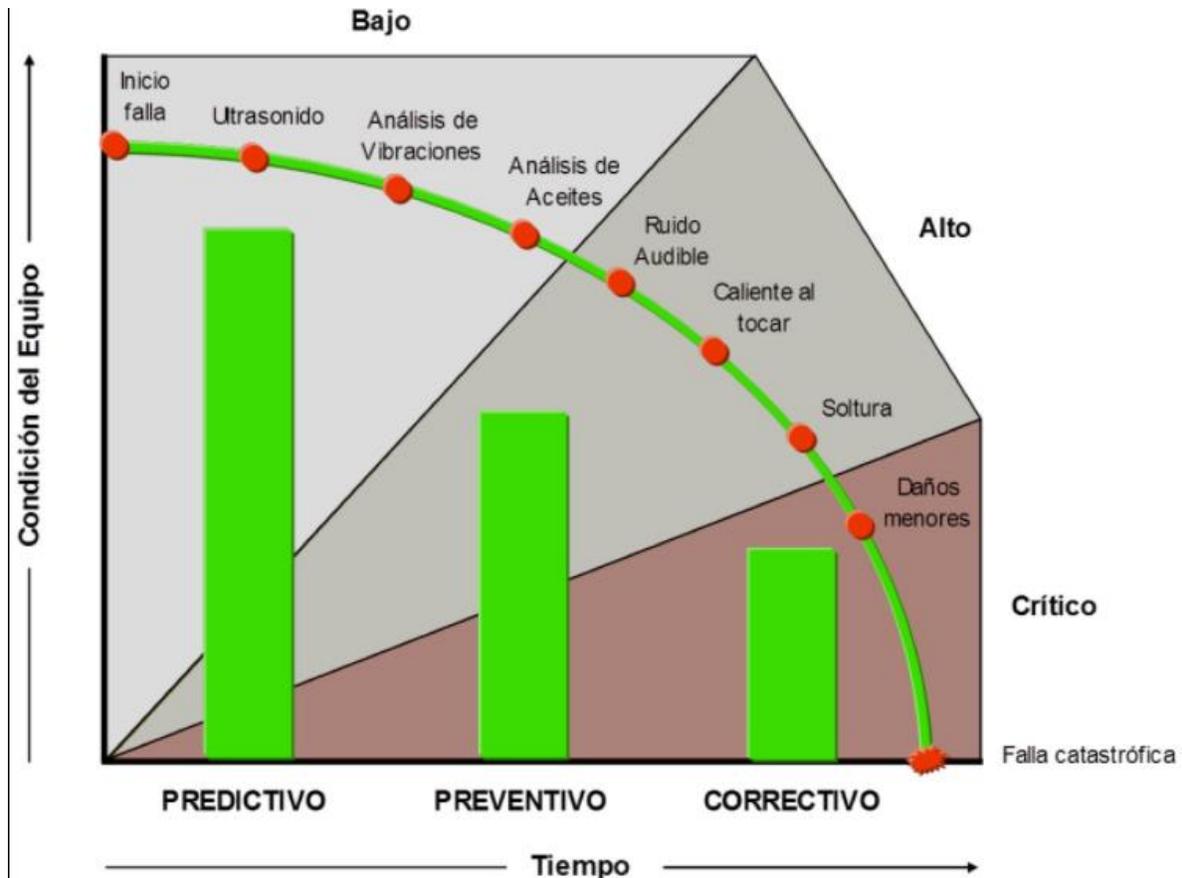


Figura 3.2 Gráfico de T-P del mantenimiento

Fuente: (Preditécnico, 2017).

### 3.4 Mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo se puede definir como una técnica para pronosticar el punto futuro de rotura o avería de un componente de una máquina, logrando que

un componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de la que llegue a una condición de falla. De manera tal, que el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.

Divido los costos que representa este tipo de metodología, sólo es aplicado a las secciones sensibles de una industria. Las tecnologías modernas brindan diversos métodos que asienten en el análisis de las condiciones internas de la maquinaria; sin realizar una invasión del equipo y sin afectar su funcionamiento normal. En la actualidad uno de los métodos más utilizados a nivel mundial por su efectividad es el análisis por vibraciones mecánicas. Este análisis de vibraciones, junto con otros parámetros específicos de cada máquina, constituye la base del mantenimiento predictivo.

Esto se lleva acabo con el fin de que la medición de diversos parámetros que muestren una relación predecible con el ciclo de vida del componente.

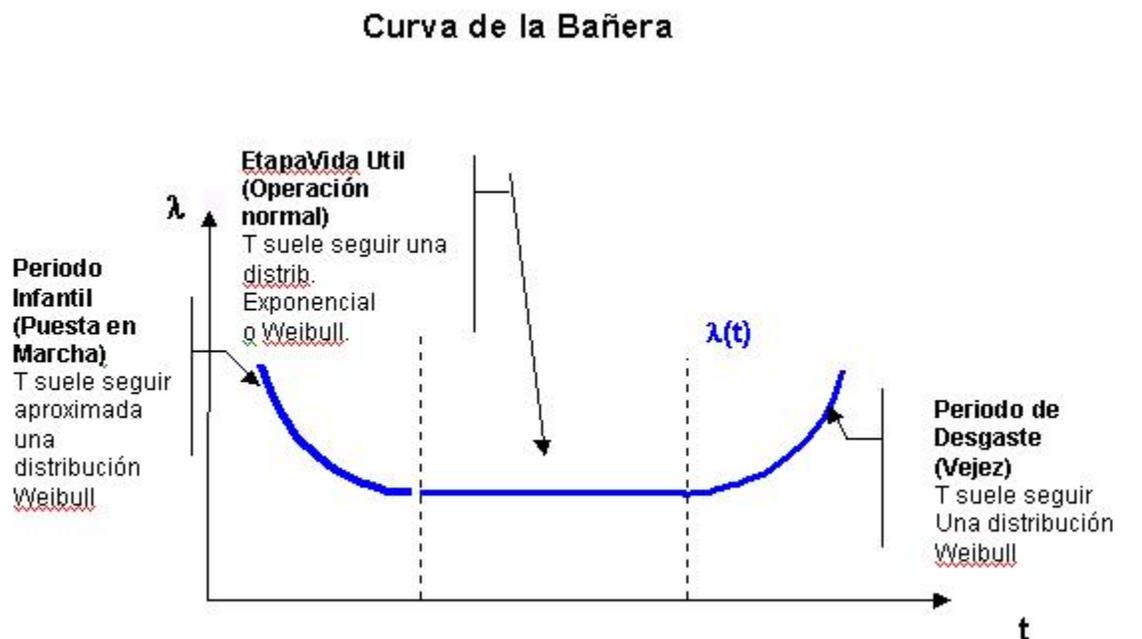


Figura 3.3 Diagrama de bañera para la vida de los elementos.

**Fuente:**(cybertesis, 2017).

Algunos ejemplos que se pueden mencionar de dichos parámetros son los siguientes:

- 1) Vibración de cojinetes.
- 2) Temperatura de las conexiones eléctricas.
- 3) Resistencia del aislamiento de la bobina de un motor.

El uso del mantenimiento predictivo consiste en establecer, en primer lugar, una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente. Esto se logra mediante la toma de lecturas en intervalos periódicos hasta que el componente se fragmente o se averíe.

### 3.5 Mantenimiento-predictivo-frente-a-los-otros-tipos-de-mantenimiento.

En todas las instalaciones y plantas industriales donde existe maquinaria de producción con elementos dotados de movimiento rotativo o alternativo, se hace necesario efectuar un mantenimiento de estas máquinas para conservarlas en correcto estado de servicio y garantizar la seguridad y fiabilidad de la planta. Este mantenimiento puede ser más o menos sofisticado, Mantenimiento Predictivo por Vibraciones Mecánicas 2 dependiendo de la naturaleza e importancia de las máquinas que se consideren, agrupadas en varios estados que van desde el más simple, hasta el más complejo. Para formarse un mejor criterio de lo que significa y aporta el mantenimiento predictivo será comparado con su antecesor: el mantenimiento preventivo.

### 3.6 Análisis de vibraciones.

El interés de las Vibraciones Mecánicas llega al Mantenimiento Industrial de la mano del Mantenimiento Preventivo y Predictivo, con el interés de alerta que

implica un elemento vibrante en una máquina, y la necesaria prevención de las averías que conllevan las vibraciones a medio plazo.

A través de un equipo de medición de vibraciones que capture las señales, dichas señal puedes ser interpretada mediante un análisis espectral la cual se relaciona con la velocidad y aceleración de rotación, el tipo de defecto y de carga aplicada.

Algunos de los defectos que se pueden controlar por vibraciones son:

- 2) Desbalance.
- 3) Desalineación.
- 4) Pata coja.
- 5) Daños eléctricos en motores y generadores.
- 6) Daños en rodamientos.
- 7) Problemas de lubricación.
- 8) Cavitación.
- 9) Otros.

Dentro de los beneficios que podemos destacar por la implementación de este tipo de sistema podemos resaltar:

- 1) Genera ahorro debido a que permite generar actividades de mantenimiento específicas de manera tal que no afecte el proceso productivo y la detección temprana de fallas.
- 2) Reduce el riesgo de sufrir paros imprevistos.
- 3) Se reducen los tiempos que los elementos están fuera de producción.
- 4) Reduce costos de repuesto ya que ayuda a extender la vida útil de los componentes de los componente de las maquinas.
- 5) Contribuye a ahorrar energía ya que operar equipos con desperfectos disminuye la eficiencia de operación.

En el caso de un aerogenerador, la técnica de análisis de vibraciones es usado típicamente para el monitoreo de tres componentes claves en el tren motriz: la caja multiplicadora, el rodamiento principal y el generador (Sheng & Veers, 2011). Siendo este monitoreo normalmente del tipo en línea, esto debido a la imposibilidad de realizar el monitoreo fuera de línea, con equipo externo mientras el aerogenerador se encuentra en operación, esto por factores de seguridad. En la Figura 3.4, se presenta un ejemplo de configuración para el sistema de monitoreo de condición para el análisis de vibraciones en una turbina eólica. El cual se encuentra conformado, por ciertos Acelerómetros y el sistema de adquisición de datos (DAS, por sus siglas en inglés, data acquisition system) en conjunto corresponde al sistema de diagnóstico de condición. Además, se cuenta con un servidor de datos, el cual típicamente se encontrará en el parque eólico o en el centro de control, pudiendo variar el método de comunicación entre el DAS y el servidor de datos en el parque eólico, pero típicamente son utilizadas conexiones Ethernet, cableado de fibra óptica y en caso necesario, se configura para transmitir de manera inalámbrica hacia un centro remoto.

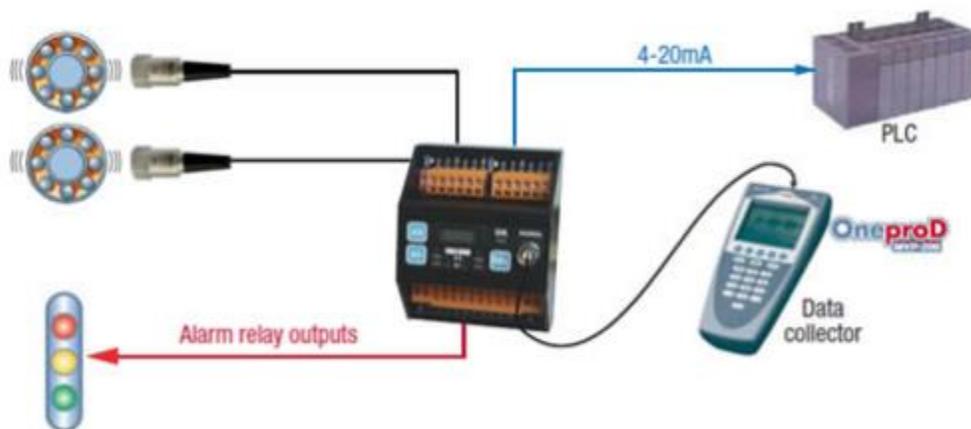


Figura 3.4 Ejemplo de configuración para el monitoreo de condición mediante el análisis de vibraciones  
**Fuente.** (Inessman,2017).

Estos sistemas de monitoreo de condición basados en análisis de vibraciones, se encuentran diferenciados principalmente por: el número de Acelerómetros utilizados, los puntos de medición y los algoritmos de análisis. Pero se debe mencionar, que los acelerómetros estándar son los dispositivos físicos mayormente empleados (Sheng y Veers, 2011). Con respecto a los algoritmos de análisis, difieren respecto al enfoque utilizado, ya que estos son clasificados en dos grandes grupos: dominio del tiempo y dominio de la frecuencia. En la Tabla 3.1, se muestran los valores de referencia para evaluar la vibración en los componentes críticos del sistema y los rangos de frecuencia, para aerogeneradores con salida nominal igual o menor a 3 MW.

Tabla 3.1 Valores de referencia para turbinas eólicas Onshore con salida nominales menores o iguales a 3 MW

<b>Componente</b>	<b>Evaluación rms de la aceleración (m/s<sup>2</sup>)</b>	
<b>Rotor</b>	Rango de frecuencia ≤ 0,1 Hz a 10 Hz	
	Límite Zonas I/II	Límite Zonas II/III
	0,3	0,5
<b>Generador</b>	Rango de frecuencia ≤ 0,1 Hz a 10 Hz	
	Límite Zonas I/II	Límite Zonas II/III
	10,0	16,0
<b>Caja Multiplicadora</b>	Rango de frecuencia ≤ 0,1 Hz a 10 Hz	
	Límite Zonas I/II	Límite Zonas II/III
	0,3	0,5
	Rango de frecuencia ≤ 10 Hz a 2000 Hz	
	Límite Zonas I/II	Límite Zonas II/III
	7,5	12,0

**Fuente:** Norma ISO 10816-21 (2015).

### 3.7 Sistemas binarios y multi-estados.

La configuración del sistema según lo establecido por Loria (2016), la confiabilidad de un sistema depende de la confiabilidad de los componentes que conforman dicho sistema, lo cual implica que tener un conocimiento del estado de los equipos críticos de un sistema es crucial para maximizar el funcionamiento de un equipo, ahí es donde las herramientas de mantenimiento predictivo como los es el monitoreo de vibraciones ya que permite conocer el estado de los elementos y cualquier anomalía que se presente en su condición normal de funcionamiento. Donde un componente es definido como la mínima unidad que conforma al sistema, mientras el subsistema se encuentra formado por un conjunto de componentes. Finalmente, el sistema se encuentra conformado por un grupo de sub-sistemas. Tradicionalmente, los sistemas o componentes son considerados entre dos posibles estados: funcionando o en falla, por lo que se dice que corresponde a un sistema o componente binario, en la Figura 6 se representa este sistema. Para este sistema es asumido que desempeñará la función deseada hasta que falle. Dicha falla, desde el estado de operación al estado de falla, sigue una función de densidad de probabilidad (PDF), de acuerdo a las características del sistema.

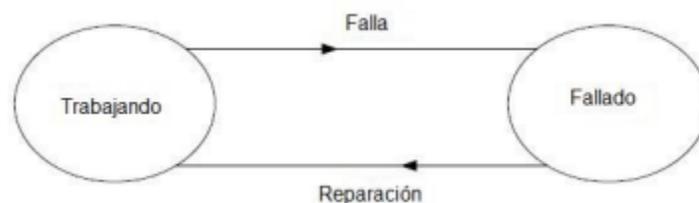


Figura 3.5 Representación de Sistema Binario  
**Fuente:** Pandey (2014).

Asumir algunos sistemas como binarios, no refleja los posibles estados que puedan presentar, ya que estos pueden desempeñar sus funciones con más de dos niveles distintos, lo cual es conocido como tasas de desempeño. Este tipo de sistemas, es llamado sistema multi-estado, donde las tasas de desempeño varían desde la operación perfecta hasta el estado de falla total (Pandey, 2014). Como es definido por Pandey (2014), los sistemas multi-estado son divididos en estado continuo y estado discreto. En el estado continuo el sistema se considera en falla cuando se degrada más allá de un valor pre-definido, lo cual involucra un alto nivel de complejidad matemática. Es por esa razón, que el sistema multi-estado de estado discreto resulta popular en el modelado de la confiabilidad. Por lo que en la Figura 3.6. Se muestra esta configuración, conformada por un total de  $v+1$  estados (con  $v \geq 1$ ). El estado  $v$  corresponde al mejor estado de desempeño (condición como nuevo) y el estado 0 corresponde al estado de falla; mientras, que los estados entre 1 y  $v-1$  son estados intermedios de degradación. Bajo este concepto, las labores de mantenimiento, tienen como finalidad mejorar el desempeño del sistema al llevarlo a un estado superior.

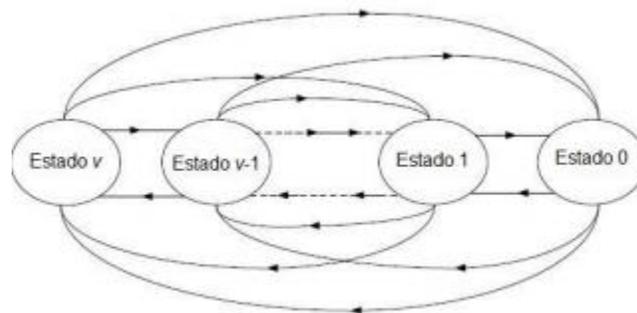


Figura 3.6 Representación de Sistema Multi-estado  
**Fuente:** Pandey (2014).

Finalmente, se debe tener claro la diferencia entre los conceptos de edad calendario y edad efectiva. La primera hace referencia al tiempo transcurrido

desde la instalación del componente; mientras el segundo refleja la condición del componente en el punto actual (Loria, 2016).

Redes neuronales artificiales Las redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés, Artificial Neural Networks) pueden ser vistas como un modelo matemático, el cual es inspirado en el funcionamiento de las neuronas humanas (Gershenson). En la Figura 3.7, se muestran las partes que conforman una neurona humana. El funcionamiento en la neurona humana, parte del recibimiento de una señal a través de la sinapsis localizada en las dendritas; cuando la señal recibida es suficientemente fuerte, la neurona es activada y emite una señal a través del axón. Esta señal puede ser enviada a otra sinapsis y puede activar otras neuronas. Estas trabajan de manera paralela, con el fin de comunicar señales a través de sinapsis.

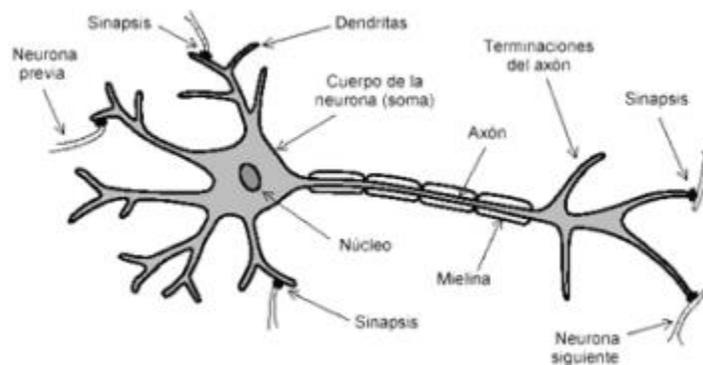


Figura 3.7 Partes de una Neurona humana

**Fuente:** Ruiz (2017).

Por lo que las redes neuronales artificiales, corresponden a una conexión de neuronas artificiales que simulan el sistema nervioso del ser humano. Por lo que tiene la ventaja potencial de manejar el mapeo no lineal de entradas y salidas requeridas del sistema. (Masoum, 2015) Marsland (2017) menciona que el primer modelo utilizado de red neuronal fue propuesto por Warren McCulloch y Walter

Pitts en 1943, el cual ha sido la base de otros modelos. En la Figura 3.8, se muestra el funcionamiento de este modelo, donde el componente básico corresponde al cuerpo de la neurona y es llamado nodo o unidad. Este es el que recibe las entradas de otras unidades o fuentes externa ( $x_m$ ), las que son equivalentes a la sinapsis en una neurona humana. Cada una de estas entradas tiene un peso asociado ( $w_m$ ), por lo que mientras mayor sea el peso, mayor será la entrada respectiva. Pudiendo ser los pesos negativos o positivos, en función si la señal es inhibitoria o excitadora respectivamente.

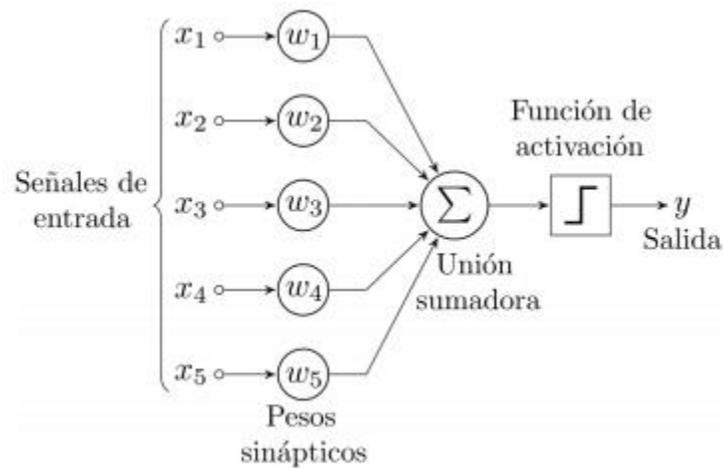


Figura 3.8 Elementos de una red neuronal artificial

**Fuente:** Ruiz (2016).

### 3.8 Aerogeneradores.

En la actualidad se ha generado la conciencia de la necesidad de aprovechar al máximo las fuentes de producción de energía en especial aquellas renovables, una de ellas es la aero-generación la cual se da por medio de una turbina eólica, la cual la podemos describir como un mecanismo que convierte la energía cinética presente en el viento y la transforma en energía mecánica, la cual a su vez es transformada en energía eléctrica mediante un generador.



Figura 3.9. Aerogeneradores de eje horizontal de tres palas, Parque Eólico Los Santos.

**Fuente:** COOPESANTOS (2017)

Para el presente trabajo se describe los principales componentes que conforman los sistemas de generación por medio de aerogeneradores horizontales de tres palas.

### 3.9 Elementos de en Aerogenerador.

Para los modelos de aerogeneradores GAMESA G52/850 que son los instalados en el Parque Eólico Los Santos, se pueden enumerar las partes en la figura que se presenta a continuación:

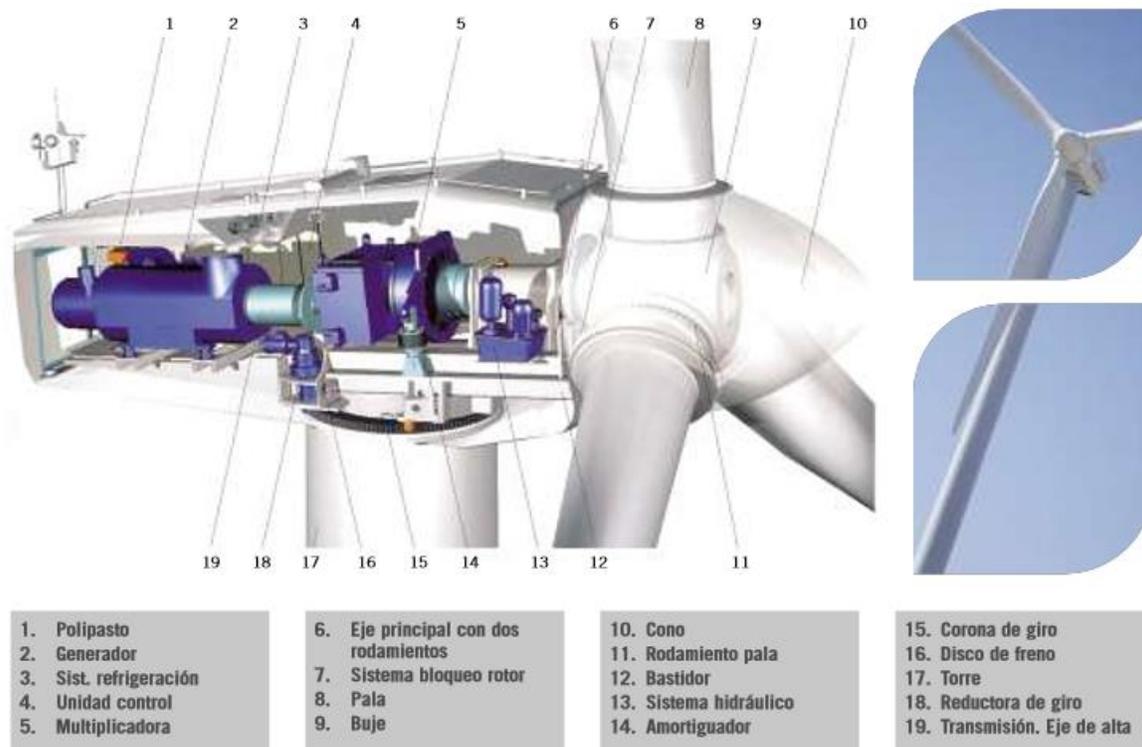


Figura 3.10. Principales partes de un Aerogenerador.

**Fuente:** ABB (2011).

### 3.10 Rotor.

Es un sistema conformado por las palas y el buje. En la figura 3.11 se muestra en modelo de las palas son los componentes que interactúan con el viento, se

diseñan con un perfil de manera tal que maximice su eficiencia aerodinámica. Ya que se desempeñan bajo fuerzas aerodinámicas, estas crecen rápidamente a medida que nos alejamos del buje; por ello es importante diseñar el extremo de la pala con el fin de tener una buena sustentación y una baja resistencia aerodinámica. Se fabrican con materiales ligeros, como son los plásticos reforzados con fibra, con buenas propiedades de resistencia al desgaste.

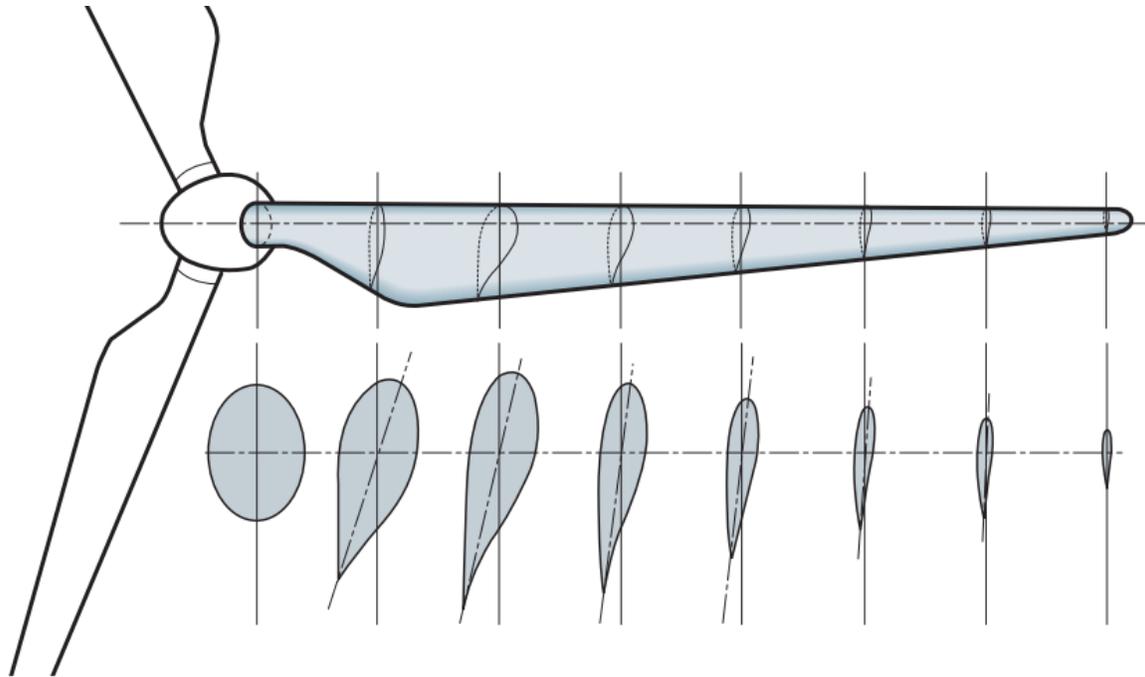


Figura 3.11. Modelo de la sección transversal de palas de un aerogenerador.  
**Fuente:** ABB (2011).

En la figura 15 se representan tres tipos diferentes de bujes que es el componente que conecta las palas al eje principal, transmitiéndole la potencia extraída del viento. Este elemento por lo general el construido de acero o de fundición y se protege externamente con una funda ovalada denominada cubierta.

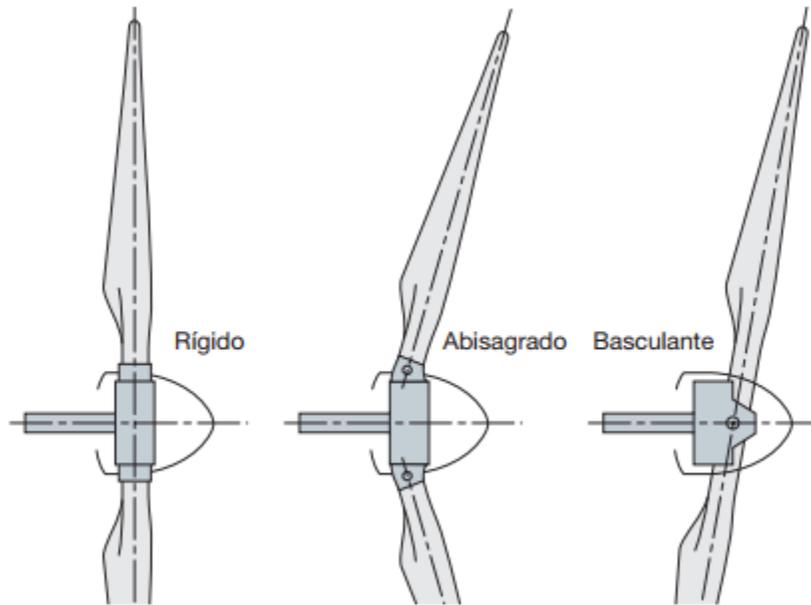


Figura 3.12. Bujes de tipo Rígido, Abisagrado y Basculante.

**Fuente:** ABB (2011).

### 3.11 Multiplicadora.

La figura 3.12 muestra una caja multiplicadora, las cuales pueden ser de una o varias etapas entre el rotor que extrae la energía cinética del viento y la convierte en energía mecánica de rotación. Su misión consiste en aumentar la velocidad de rotación del rotor, para adaptarla a los valores requeridos por los generadores. Está constituido por una o varias parejas de engranajes de tipo helicoidales. Es una fuente de ruido y uno de los componentes que requiere mayor mantenimiento y pérdidas de eficiencia al aerogenerador.



Figura 3.13. Caja multiplicadora.

**Fuente:** (Spares in Motion logo, 2017).

### 3.12 Sistemas de Frenos.

La mayoría de las turbinas eólicas emplean frenos mecánicos utilizados sobre el tren motriz, en adición al freno aerodinámico. En muchos casos, además de actuar como "frenos de parking" e impedir que el rotor gire cuando el aerogenerador está fuera de servicio, los frenos mecánicos son capaces de detener el rotor en condiciones meteorológicas adversas. Los frenos mecánicos que se usan comúnmente son de dos tipos: frenos de disco y frenos de fricción.

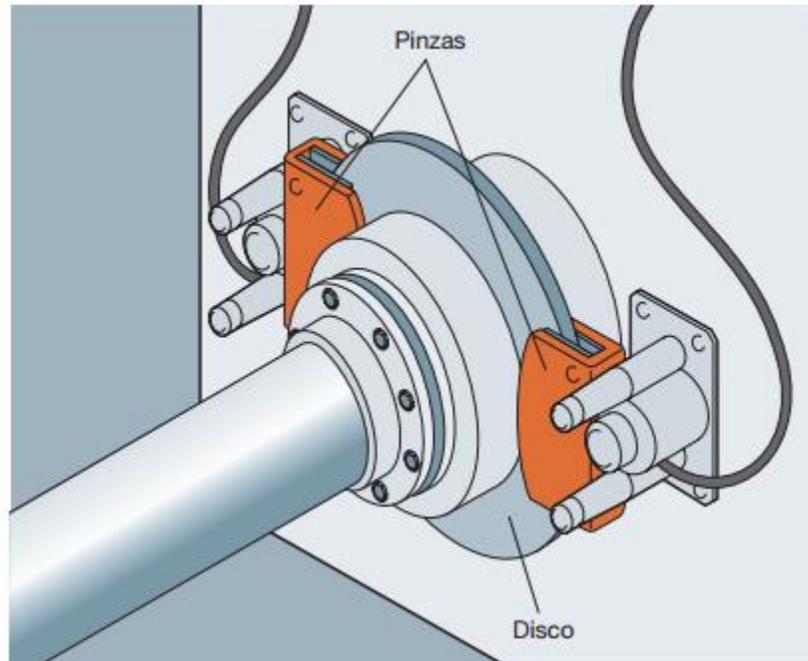


Figura 3.14. Representación de un freno de disco.

**Fuente:** ABB (2011).

Los frenos mecánicos se pueden colocar tanto en el lado de baja velocidad del multiplicador como en el de alta. Sin embargo hay que tener en cuenta que si se instalan en el lado de baja velocidad deben ser capaces de ejercer un par de freno mayor, mientras que si se instalan en el de alta van a trabajar a través del multiplicador, acelerando probablemente su desgaste; por otro lado, si el multiplicador se avería, los frenos en el lado de alta velocidad pueden quedar inoperativos e incapacitados para frenar el rotor.

### 3.13 Generador.

Este elemento es el encargado de convertir la energía mecánica transmitida de la caja multiplicadora en energía eléctrica, existen dos tipos de generadores:

**Generadores Asíncronos:** en esencia es un motor de inducción trifásico con velocidad sincrónica, dependiente del número de polos que lo constituyen y la frecuencia de la red. En estos se aplica el concepto de deslizamiento ( $s$ ), que corresponde a la diferencia relativa entre la velocidad síncrona y la velocidad real de giro del rotor, la cual es negativa para el caso de los generadores.

**El generador sincrónico (alternador):** consiste de un rotor conformado por un electroimán de corriente directa o de imanes permanentes. Como su nombre lo indica, la frecuencia del voltaje generado en el estator es directamente proporcional a la velocidad de rotación del rotor, no existe deslizamiento.

### 3.14 Sistemas auxiliares.

Dentro de los sistemas auxiliares se pueden mencionar:

- 1) Los dispositivos de sistemas hidráulicos para la lubricación del multiplicador o de los demás componentes mecánicos.
- 2) Intercambiadores de calor para la refrigeración del aceite y del generador, que incluyen bombas y ventiladores.
- 3) Anemómetros y veletas para el control del aerogenerador, luces de señalización para los aviones, que se colocan en la parte exterior de la góndola.
- 4) Para mejorar la fiabilidad de los aerogeneradores, se utilizan diferentes Acelerómetros que monitorizan el estado de distintos componentes y avisan de posibles fallos que exijan operaciones de mantenimiento ( *ABB,2011*).

### 3.15 Sistema de orientación.

Este sistema está constituido por la góndola que se hace rotar sobre la parte superior de la torre con un sistema de control de orientación y rotación activo, para conseguir que el rotor esté siempre en una posición transversal a la dirección del viento. La dirección y velocidad del viento son monitorizadas continuamente mediante Acelerómetros ubicados en la cubierta de la góndola (ABB,2011).

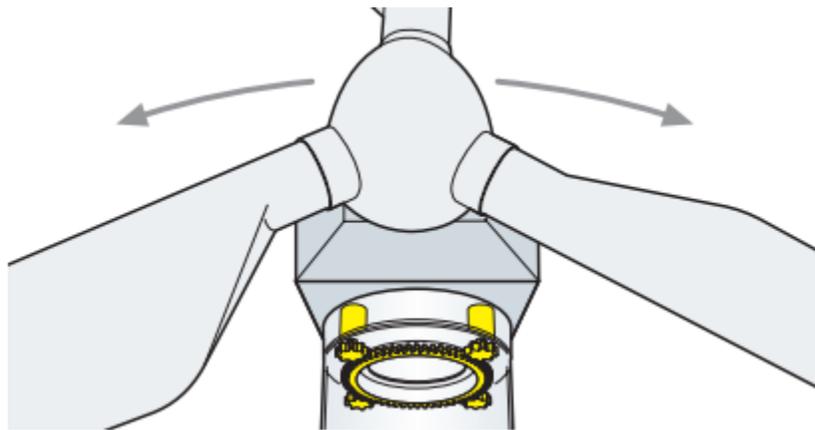


Figura 3.15. Sistema de Orientación.

**Fuente:** ABB (2011).

## CAPÍTULO 4: Desarrollo.

---

### 4.1 Análisis del equipo de monitoreo de vibraciones y elementos que lo componen.

El equipo que se implementara para realizar el análisis de monitoreo de vibraciones es de la marca “ifm”, la cual es una empresa alemana que se desempeña en el área de la automatización desde hace 40 años y su mercado comprende más de 80 países entre los cuales se encuentra Costa Rica. En nuestro país estos productos son distribuidos por gen-bus, la cual tiene más de 20 años de estar trabajando en el mercado de distribución de equipos para la industria y comercio.

El equipo de monitoreo ifm “Multiplex Vibration System” se desarrolla en base a la necesidad que surge en la de realizar un monitoreo inteligente de los equipos es industria. Aprovechando el monitoreo continuo permite identificar problemas que causen problemas imprevistos creando una huella digital del estado de funcionamiento del equipo, de manera que se pueda realizar un análisis de las tendencias de comportamiento y generar alarmas cuando el funcionamiento de los equipos sale de los parámetros normales de funcionamiento

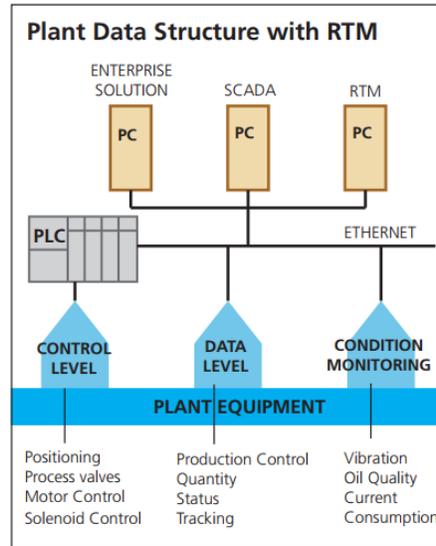


Figura 4.1 Diagrama de comunicación del sistema de monitoreo de vibraciones.

**Fuente:** (ifm, 2017).

El sistema de monitoreo ifm dentro de las ventajas que nos ofrece podemos mencionar:

- 1) Permite realizar monitoreo de vibraciones hasta de 4 canales de monitorización independientes.
- 2) Suministra protección continua de la máquina en línea en tiempo real.
- 3) La interfaz Ethernet permite el acceso remoto y la transferencia de datos.
- 4) Cuenta con memoria integrada que almacena un historial del comportamiento de las tendencias de vibraciones.
- 5) Software de servidor OPC disponible para integración con sistemas de control de alto nivel.
- 6) Software presenta una interface de configuración fácil de usar.
- 7) Cuenta tanto con salidas de alarma digital y analógica.

Dado que el sistema que se plantea instalar en los aerogeneradores es un kit modular está compuesto por una serie de elementos dentro de los cuales se encuentran:

2	Electrónicas de diagnóstico VSE 100
8	Acelerómetros VSA 001
8	Conectores Hembra con cable de 15 m EVC651
1	Software de parametrización VES004

Para los cuales es importante conocer sus características técnicas de cada uno de estos elementos para poder considerar aspectos de instalación y funcionamiento de cada uno de los elementos que forman parte de este elemento.

#### 4.1.1 Electrónica de diagnóstico.

El modelo que se implementará es el VSE 100, este elemento es el encargado de la recolección de los datos que provienen los Acelerómetros y es el encargado de la administración de los mismos, se puede describir como el cerebro del sistema de monitoreo de vibraciones ya que es el encargado de la conversión de las señales suministradas por los Acelerómetros en valores que puedan ser representados e interpretados mediante el software pertinente (ifm, 2017).



Figura 4.2. Electrónica VSA 100

**Fuente:** Fotografía propia.

Dentro de las consideraciones que se deben de tener previos a su utilización de este elemento se pueden numerar las siguientes:

- 1) La electrónica cuenta con 2 entradas analógicas y 4 entradas dinámicas. Dichas entradas pueden ser utilizadas para la supervisión de valores del proceso, la supervisión y el diagnóstico de vibraciones o el 4 análisis de otras señales dinámicas. El funcionamiento definitivo se rige según la respectiva versión del firmware. Las versiones actuales del firmware y del software de usuario están disponibles en todo momento en el área de descargas de la página de ifm electronic (ifm, 2017).
- 2) En las entradas analógicas se puede conectar una señal analógica de corriente o una señal de impulsos. Estas pueden utilizarse como fuente de velocidad de rotación para el diagnóstico de vibraciones, como trigger de una medición o para la supervisión de valores del proceso (ifm, 2017).
- 3) En las entradas dinámicas puede conectarse también una señal analógica de corriente para supervisar un máximo de 4 valores adicionales del proceso. Aparte de esto, pueden conectarse hasta 4 detectores de vibraciones de ifm (tipo VSA, VSP) o Acelerómetros con una señal IEPE estándar (ifm, 2017).
- 4) Las opciones para la supervisión y el análisis de señales se orientan según la versión correspondiente del firmware (ifm, 2017).
- 5) Los estados de alarma de las tareas de control son indicados a través de los LED del detector correspondiente en la electrónica de diagnóstico y/o en las 2 salidas de hardware. Las salidas de hardware pueden ser configuradas como 2 x binaria (na/nc, PNP) o 1x analógica (0/4...20 mA) y 1x binaria (na/nc, PNP) (ifm, 2017).
- 6) Las 8 E/S digitales de la electrónica de diagnóstico pueden utilizarse bien como salidas adicionales de alarma (na/nc, PNP), o bien como entradas digitales (variantes, restablecimiento de contador).

Dentro de las funciones que se pueden sustraer de firmware (es un conjunto de instrucciones para los programas informático como por ejemplo el ROM) se pueden enumerar:

- 1) Supervisión online para el control de valores del proceso superiores o inferiores a los límites de hasta 24 indicadores de las señales dinámicas (p. ej. vibración) en el rango de tiempo o de frecuencia (FFT y/o H-FFT). La supervisión de los objetos puede llevarse a cabo teniendo en cuenta hasta 2 variables del proceso (ifm, 2017).
- 2) Memoria interna de la tendencia con registro de hora RTC e intervalos de memoria flexibles por cada objeto (ifm, 2017).
- 3) Función de contador Para la supervisión y evaluación de las señales dinámicas de vibración, el firmware ofrece los siguientes recursos y funciones.
- 4) Análisis espectral FFT, envolventes FFT, análisis de la tendencia.
- 5) Monitorización global según ISO 10816 con ajuste variable del filtro.
- 6) La configuración de todos los parámetros y de las tareas de control (valores del proceso) se lleva a cabo a través del software para PC con ref. VES004. A través de la interfaz Ethernet de la electrónica de diagnóstico existe la posibilidad de establecer una red para la visualización de datos (valores de medición, estados de alarma, etc.) (ifm, 2017).

#### 4.1.1.1 Funcionamiento

Las señales de las entradas se registradas de forma continua y se revisan de forma continua en función de las tareas programadas mediante los parámetros establecidos. Las tareas de control de los valores del proceso y de los objetos son definidas utilizando un software en el PC para nuestro caso VES004, a partir del cual son transmitidas a la electrónica de diagnóstico en forma de parámetro a través de la interfaz Ethernet. La supervisión de los valores característicos en el rango de frecuencia se efectúa de forma secuencial, mientras que la supervisión en el rango de tiempo se lleva a cabo de forma simultánea. Los estados de alarma de los objetos configurados pueden ser indicados hasta en 2 salidas digitales. La

salida 1 (OU 1) también se puede utilizar como salida analógica (transmisión de vibraciones totales según ISO 10816). Los estados de alarmas de objetos asignados a una de las 4 entradas dinámicas (detector 1...4) se indican en los LED correspondientes de la electrónica de diagnóstico. Las E/S digitales también pueden ser utilizadas como salidas de alarma para verificar con más exactitud la fuente de la misma. El estado de funcionamiento de la electrónica y de los detectores también se indica a través de los LED de varios colores en el equipo (ifm, 2017).

#### 4.1.1.2 Montaje.

Monte el equipo en un armario eléctrico con un grado de protección mínimo IP 54 de manera que se garantiza la protección contra un contacto accidental con tensiones peligrosas al contacto y contra las influencias atmosféricas. El armario eléctrico debe estar instalado en conformidad con las disposiciones del código eléctrico nacional. Monte el equipo en un carril. Se instala en posición vertical y deje espacio suficiente con respecto a la base o la cubierta del armario eléctrico.

De manera que evite la filtración de suciedad conductora o de otro tipo durante el montaje y las operaciones de cableado.

#### 4.1.1.3 Conexión eléctrica

Al realizar la conexión eléctrica se debe de tener especial cuidado dada la naturaleza de este tipo de equipo por lo cual se debe de tener en cuenta:

Asegurarse que este desconectar la alimentación del equipo, después conecte el equipo, para evitar mermas de funcionamiento debidas a tensiones parásitas, el cable del detector y el cable de carga debe ser distribuido por separado. Longitud máxima del cable del detector: 250 m (ifm, 2017).

Las salidas se pueden configurar como normalmente abierto o normalmente cerrado. Asimismo se puede emitir una señal analógica en la salida [OU 1] (0/4...20 mA) o en [U-OUT] (0...10 V) (ifm, 2017).

#### 4.1.1.4 Límite de voltaje.

Según el estándar para equipos de control industria UL508, el aparato debe recibir el suministro de tensión de una fuente de alimentación con separación galvánica que disponga en la parte secundaria de un fusible con homologación UL y una corriente nominal máxima de:

1. 5 A con tensiones de 0...20 Vrms (0...28.3 Vp)
2. 100/Vp con tensiones de 20...30 Vrms (28.3...42.4 Vp)

#### 4.1.1.5 Conexión

La conexión del equipo se debe de realizar en base al siguiente diagrama:

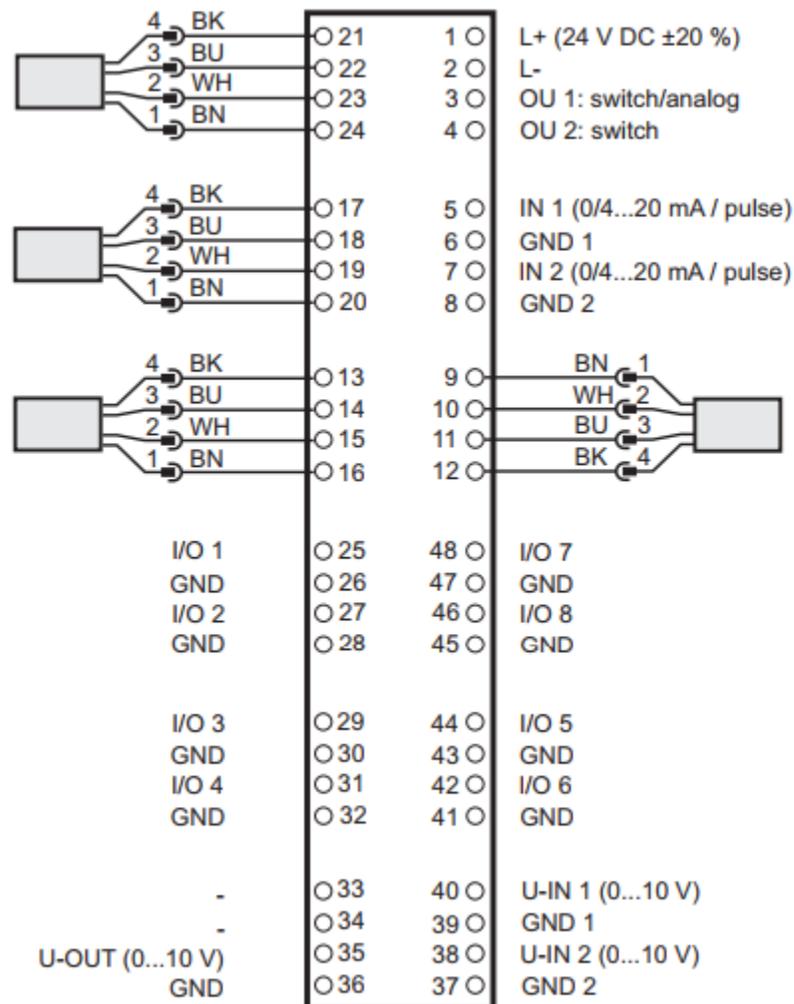


Figura 4.3: Diagrama de conexión de electrónica VSE 100.

Fuente: (ifm, 2017).

Tabla 4.1. Tabla de descripción de las terminales de conexión.

Número de terminal	Conexión	Significado			
1	L+	En caso de utilizar un sensor IEPE0 VSP de 24 VDC +20%			
2	L-				
3	OU 1	Salida para pre alarma			
4	OU 2	Salida alarma principal			
5	IN 1	Entrada de valores del proceso 1			
6	GND1				
7	IN 2	Entrada de valores del proceso 2			
8	GND 2				
		<b>VSA</b>	<b>VSP</b>	<b>IEPE</b>	<b>0...20 mA</b>
9	Sensor1 (S1)	BN alimentación del sensor 9 V	N/A	N/A	N/A
10		WH entrada de corriente 0...10 mA	WH entrada de corriente	IEPE	entrada de corriente 0...20 mA
11		BU GND	BK GND	GND IEPE	GND
12		BK salida para auto-test	N/A	N/A	N/A
13	Sensor2 (S2)	BK salida para auto-test	N/A	N/A	N/A
14		BU GND	BK GND	GND IEPE	GND
15		WH entrada de corriente 0...10 mA	WH entrada de corriente	IEPE	entrada de corriente 0...20 mA

16		BN alimentación del sensor 9 V	N/A	N/A	N/A
17	Sensor3 (S3)	BK salida para auto-test	N/A	N/A	N/A
18		BU GND	BK GND	GND IEPE	GND
19		WH entrada de corriente 0...10 mA	WH entrada de corriente	IEPE	entrada de corriente 0...20 mA
20		BN alimentación del sensor 9 V	N/A	N/A	N/A
21	Sensor4 (S4)	BK salida para auto-test	N/A	N/A	N/A
22		BU GND	BK GND	GND IEPE	GND
23		WH entrada de corriente 0...10 mA	WH entrada de corriente	IEPE	entrada de corriente 0...20 mA
24		BN alimentación del sensor 9 V	N/A	N/A	N/A

Fuente: (ifm, 2017)

#### 4.1.1.6 Conexión de los Acelerómetros.

Durante la conexión de los detectores deben ser respetados los criterios MBTS (Muy bajas tensiones de seguridad), con el fin de que no se produzcan tensiones peligrosas al contacto en el detector y que éstas no sean transmitidas al equipo. El

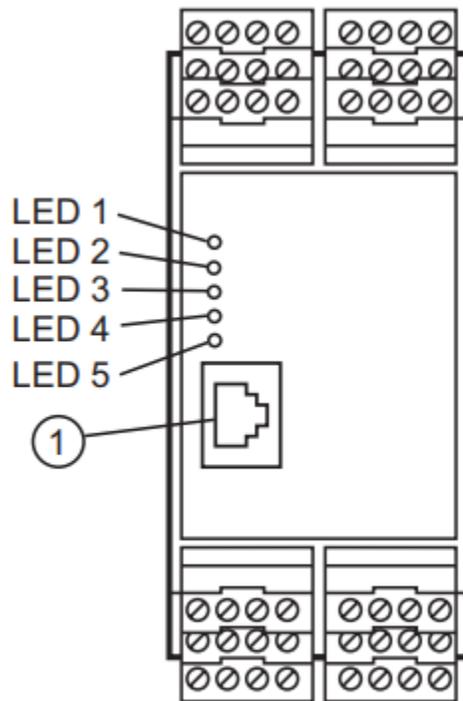
detector y la alimentación de la electrónica de diagnóstico no poseen separación galvánica

#### 4.1.1.7 Ajustes y parametrización.

La configuración de la electrónica de diagnóstico VSA 100 y la visualización de datos en línea de: señal temporal, espectros de frecuencia, valores del objeto, datos del histórico. Se lleva a cabo a mediante del software para electrónicas de diagnóstico VES004.

#### 4.1.1.8 Indicaciones de las luces led.

La electrónica cuenta con una serie de alarmas que se pueden controlar de forma visual mediante luces led los cales tiene el siguiente significado.



1: Interfaz Ethernet

Figura 4.4 Ubicación de led de alarmas.

**Fuente:** (ifm, 2017).

En la tabla presentada a continuación se presenta en significado dependiendo el estado de cada uno de los Acelerómetros y la electrónica.

Tabla 4.2 Descripción de significado de los led de la electrónica VSE 100

<b>LED de 1 al 4 para su respectivo sensor</b>	
<b>Encendido en verde</b>	detector conectado y configurado
<b>Parpadea en verde</b>	detector configurado; tipo VSA detector no conectado o defectuoso, sensor tipo IEPE no conectado
<b>Encendido en amarillo</b>	pre alarma
<b>Encendido en rojo</b>	alarma principal
<b>Parpadea en verde/amarillo alternativamente</b>	proceso teach activo
<b>LED 5 para el sistema</b>	
<b>Encendido en verde</b>	sistema OK, supervisión en curso
<b>Encendido en amarillo</b>	sistema OK, no hay supervisión debido a la configuración, al auto-test o al modo FFT
<b>Parpadea en verde/amarillo alternativamente</b>	la supervisión no es posible, paramétrico erróneo
<b>Parpadea en verde/rojo alternativamente</b>	error del sistema, fallo EEPROM, otros estados, error del sistema, funcionamiento limitado del equipo

**Fuente:** (ifm, 2017).

#### 4.1.1.9 Mantenimiento, reparaciones, eliminación.

El equipo sólo puede ser reparado por el fabricante. Elimine el equipo tras su uso respetando el medio ambiente y según las normativas nacionales en vigor.

#### 4.1.1.10 Dimensiones del equipo.

A continuación se presentan las dimensiones que presenta la unidad electrónica del Kit de monitoreo de vibraciones.

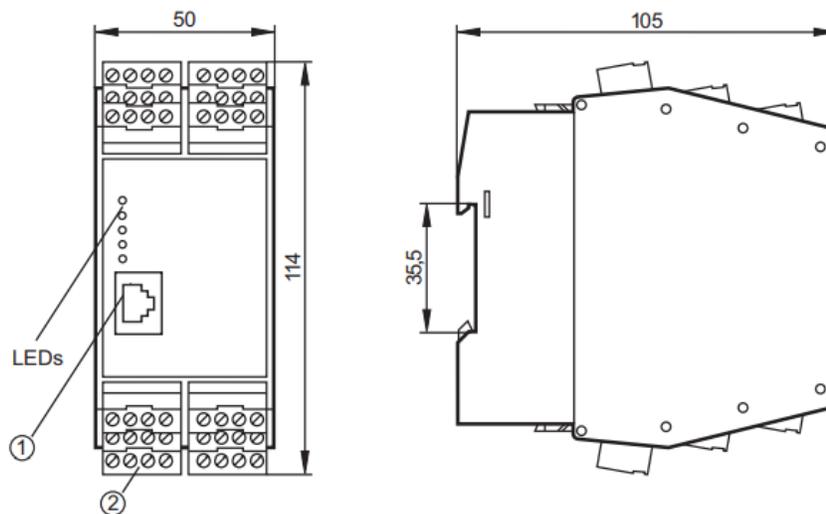


Figura 4.5. Esquema de las dimensiones de la unidad AVE 100.

**Fuente:** (ifm, 2017).

#### 4.1.2 Acelerómetros.

Son los elementos que se encargan de la recolección de los datos de vibración de las máquinas o equipos y alimentar la electrónica del kit de monitoreo.



Figura 4.6 Acelerómetro VSA 001

**Fuente:** Fotografía propia.

#### 4.1.2.1 Conexión eléctrica.

El acelerómetro presenta un sistema de conexión y desconexión, que permite la fácil comunicación con la electrónica de diagnóstico que presenta la siguiente distribución (ifm, 2017).

<b>M12</b>		Pin 1: L+ (7.2...10.8 V DC)
		Pin 2: I <sub>out</sub>
		Pin 3: GND
		Pin 4: self-test

Figura 4.7 Distribución de la conexión de acelerómetro.

**Fuente:** (ifm, 2017).

#### 4.1.2.2 Instalación

El fabricante recomienda realizar los siguientes pasos para realizar la fijación de los Acelerómetros de medición (ifm, 2017):

- 1) Coloque sobre una pared gruesa el cojinete o en el protector del extremo.
- 2) Asegúrese de que la dirección de la señal sea la adecuada.

- 3) Asegurar una transmisión de vibración segura y no permitir capas intermedias elásticas.
- 4) Apretar el sensor con un par de apriete de 8 Nm.
- 5) Use una arandela cónica en superficies planas.
- 6) Haga un agujero cónico en superficies inclinadas o curvas.

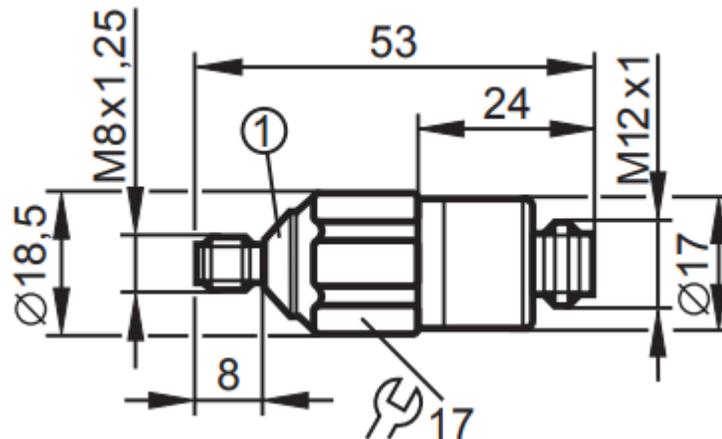


Figura 4.8 Diagrama de acelerómetros.

Fuente: (ifm, 2017)

#### 4.1.2.3 Datos técnicos.

En la tabla que se presenta a continuación contiene los datos técnicos de los acelerómetros que se implementaran en el proyecto.

Tabla 4.3 Datos técnicos de los acelerómetros.

Datos eléctricos	
Tensión de servicio [V]	7,2 ... 10,8 DC
Consumo de corriente [mA]	<15
clase de protección	III
Salida análoga	
salida de corriente [mA]	0 ... 10
Rango de medición / ajuste	

<b>Principio de medición</b>	Capacitivo
<b>Rango de medición [g]</b>	± 25
<b>Rango de frecuencia [Hz]</b>	0 ... 6000
<b>Precisión / desviaciones</b>	
<b>Sensibilidad [mg / √Hz]</b>	0,2
<b>Linealidad</b>	0,20%
<b>Ambiente</b>	
<b>Temperatura ambiente [° C]</b>	-30 ... 125, cULus: máx. 85 ° C
<b>Protección</b>	IP 68 / IP 69K
Pruebas / aprobaciones	
<b>EMC</b>	EN 61000-6-2
	EN 61000-6-3
	EN 50178
<b>MTTF [Años]</b>	1818
<b>DAtos eléctricos</b>	
<b>Tipo de sensor</b>	Sistema micro-electromecánico (MEMS)
<b>Resistencia mecánica de sobrecarga [g]</b>	500
<b>Max. longitud del cable del sensor [m]</b>	250
<b>Materiales de la cubierta</b>	caja: acero inoxidable 316L / 1.4404
<b>Tipo de montaje</b>	M8 x 1,25
<b>Peso [kg]</b>	0,048

Fuente: (ifm, 2017).

#### 4.1.3 Conector hembra EVC 651

Para la conexión entre el los acelerómetros y la electrónica de diagnóstico se emplean cables con una terminación hembra, para realizar una correcta unión entre dicho acople y el acelerómetro se debe conectar el conector al sensor; la flecha indica la derecha de la codificación (ifm, 2017).



Figura 4.9 Cable con conector hembra de 15 metros.

**Fuente:** Fotografía propia.

Para garantizar la protección la red debe ser apretada con torque de apriete de 0,6 Nm (apretado a mano) a 1,5 Nm (utilizando una llave dinamométrica). Para aplicaciones en ambientes con choques y vibraciones, apriete el acoplamiento tuerca girándola una muesca más con una llave (anchura de 14).

Tabla 4.4 Características del Cable con conector hembra.

Datos eléctricos		
<b>Diseño eléctrico</b>	AC/DC	
<b>Tensión de servicio [V]</b>	50 AC / 60 DC	
<b>Evaluación actual [A]</b>	4	
<b>clase de protección</b>	III	
Ambiente		
<b>Temperatura ambiente [° C]</b>	-25 ... 90, cULus: máx. 75 ° C	
<b>Temperatura ambiente (en movimiento) [° C]</b>	-25 ... 90, cULus: máx. 75 ° C	
<b>Protección</b>	IP 65 / IP 67 / IP 68 / IP 69K	
Datos mecánicos		
<b>Diseño</b>	angular	
<b>Cuerpo del material</b>	vivienda: TPU (uretano) naranja; sellado: Viton	
<b>Tuerca de material</b>	latón; niquelado	
<b>Par de apriete de la tuerca moleteada [Nm]</b>	0,6 ... 1,5	
<b>Adecuación de la cadena de arrastre</b>	Radio de flexión para aplicaciones flexibles:	min. 10 x diámetro del cable
	Velocidad de viaje:	máx. 3,3 m / s para una carrera horizontal de 5 m máximo. aceleración de 5 m / s <sup>2</sup>
	Ciclos de flexión:	≥ 2 millones
	Tensión torsional:	± 180 ° / m
<b>Peso [kg]</b>	0,409	

Fuente: (ifm, 2017).

#### 4.1.4 Software de parametrización VES004.

El software de parametrización VES004 se emplea con la electrónica de diagnóstico tipo VSE. El software es posibilita la creación de una estructura de árbol en que las unidades y Acelerómetros están integrados. El usuario puede ver su propia estructura familiar con respecto a sitios de producción, y máquinas y componentes (ifm, 2017).

El software contiene funciones de asistente para simplificar crea un conjuntos de parámetros para vibración y proceso supervisión. Por lo tanto, es posible establecer y definir monitoreo simple con prácticamente ningún experto anterior conocimiento. Administración de datos como parámetros conjuntos, datos de medición, grabaciones y archivos de historial se realiza de acuerdo con el proyecto predefinido estructura de árbol (ifm, 2017).

Es un software que permite la presentación de la información obtenida de la electrónica de diagnóstico, el cual hace uso de herramientas con TFF para presentar los datos de forma que permitan realizar un diagnóstico de posibles problemas sobre los equipos y la fuente de los mismo de forma tal que se puedan ejecutar actividades proactivas para la extender la vida de los elementos a monitorear (ifm, 2017).

Dentro de las características que requiere el equipo para ejecutar este software están las siguientes:

- 1) PC con Pentium III o superior.
- 2) Microsoft Windows XP / Microsoft Windows Server 2003 / Microsoft Windows Vista / Microsoft Windows Server 2008 / Microsoft Windows 7.
- 3) 1 GB de RAM (para Vista y Windows 7: 2 GB de RAM).
- 4) 1 GB de disco duro libre memoria.
- 5) Ethernet 10/100 Mbit.

Es presenta la mayor cantidad de capacidad para administrar electrónicas de diagnóstico lo que permitiría expandir el alcance del monitoreo de condición a otros elementos de los aerogeneradores.



Figura 4.10 Caratula del software VES004  
**Fuente:** Fotografía propia.

## 4.2 Puntos de instalación de los acelerómetros.

Quizá uno de los puntos que mayor impacto pueda ocasionar en la implementación de este tipo de sistema de monitoreo de vibración es el de la ubicación de los acelerómetros en los equipos ya que una correcta recolección de los datos nos permitirá una oportuna intervención conociendo el estado real del equipo.

Continuando con el modelo de implementación propuesto por el ingeniero Bryan Gerardo Bogantes Barrantes, representado en las figuras 1.2 y 1.3, para la caja multiplicadora y el generador, se propone la implementación de 5 Acelerómetros

para la validación de las neuronas artificiales referente a estos elementos los cuales se destruyen de manera tal como se muestra en la siguiente figura:

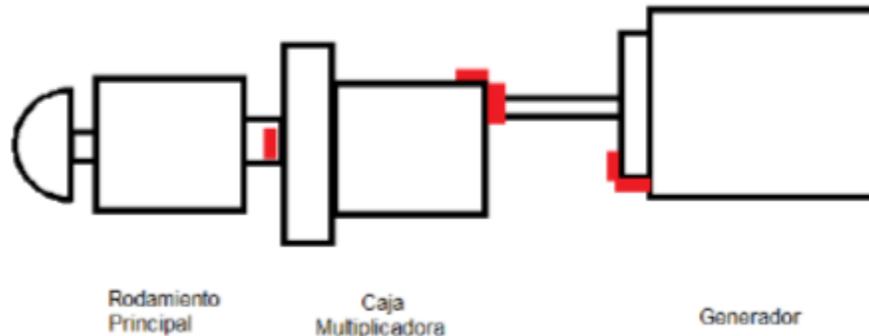


Figura 4.11 Posición de los Acelerómetros del sistema de monitoreo.

**Fuente:**(Bogantes, 1017).

De manera que la caja multiplicadora sea medida la posición vertical y horizontal, en el lado de baja de la misma. Igualmente, para el generador en la cara que se encuentra frente a la caja multiplicadora y por último un acelerómetro en rodamiento principal.

Al confrontar el modelo establecido con el kit de monitoreo adquirido el cual constaba de dos unidades electrónicas de control las cuales están capacitadas para administrar 4 acelerómetros cada una se determinó que tenemos tres ranuras de más para realizar lecturas, por lo tanto con el fin de obtener el máximo provecho de los equipos se planteó la instalación de los mismos en otro punto de interés de los mismos elementos del aerogenerador.

Como se muestra en el figura 4.12 de costos de mantenimiento para el 2016, entre los elementos de multiplicadora y generador representan casi el 80% de los gastos

por los cual son de sumamente críticos en lo respecta al mantenimiento por lo cual se opta por incrementar los puntos de medición en estos elementos.

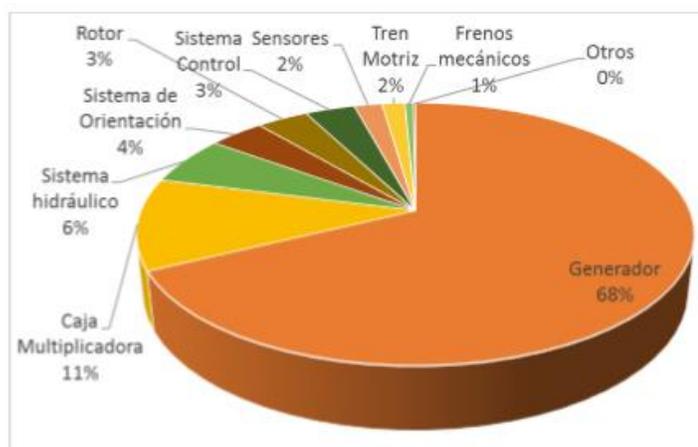


Figura 4.12 Representación de los costó de mantenimiento por sistema.

**Fuente:** (Ríos, 2017).

Al realizar un estudio de las órdenes de trabajo del período comprendido de enero del 2015 a agosto del 2017, el costo del mantenimiento ₡ 61.919.221 de los cuales el 94% corresponde a gastos por mantenimiento correctivo y sólo el 6% a mantenimiento preventivo, el cual se presenta en el gráfico 1.



Gráfico 4.1. Distribución de inversión del mantenimiento correctivo versus el preventivo, período 2015-2017.

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

Además, podemos observar en el gráfico 4.2 que el 84% de los costos están relacionados a la mano de obra y recursos consumibles en el cambio del generador que se considera un mantenimiento mayor para los aerogeneradores. El siguiente punto en importancia con respecto al gasto en correctivos está relacionado a problemas ocasionados es los roles que consta de un 11% del presupuesto, por lo que lo cual se consideran elementos críticos de funcionamientos de los equipos, el 5% restante que se resume en otros consta de mantenimientos provocados por problemas de filtrado, control eléctrico entre otros

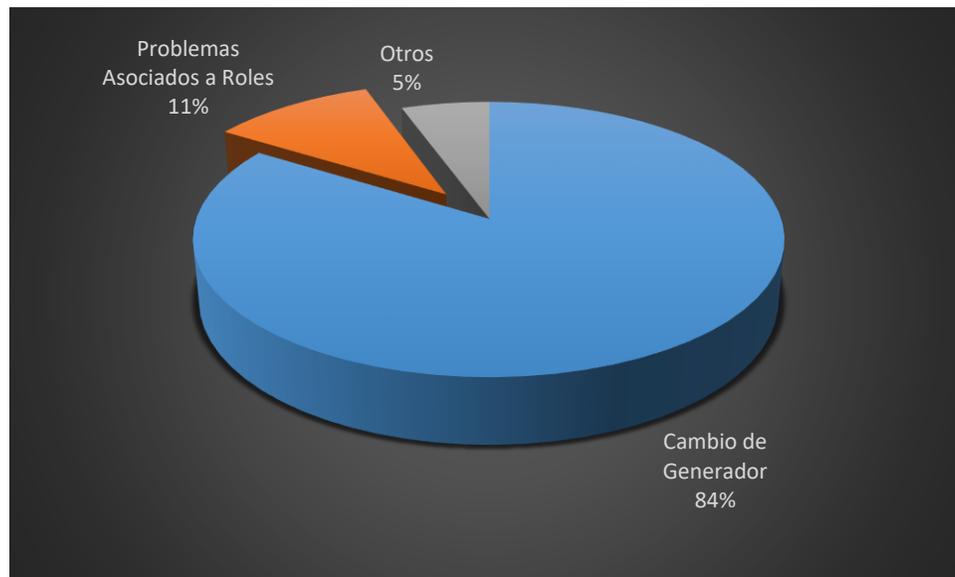


Gráfico 4.2 Distribución de gastos de mantenimientos correctivos para en aerogenerador número 5.

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

Si bien la norma ISO 10816 en el análisis de vibraciones mecánicas se recomienda la medición en tres direcciones: axial, radial y horizontal, como se muestra en la figura 4.13, para un punto de interés a analizar. Los cuales están en posición radial con respecto del eje.

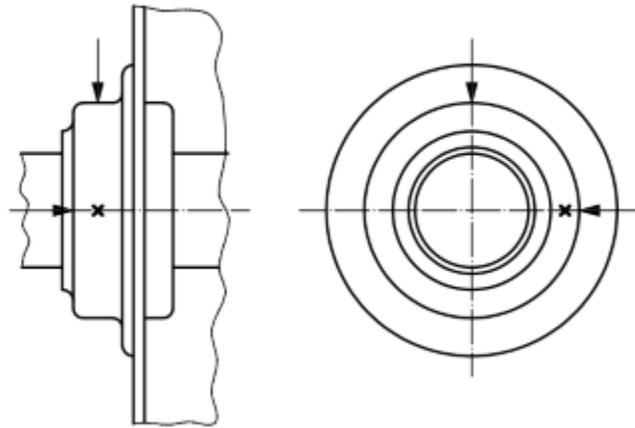


Figura 4.13 Posición de los acelerómetros según ISO 10816.

**Fuente:** Norma ISO 10816-21 (2015).

Dado que las vibraciones pueden ser causadas por errores de fabricación o ensamblaje, por ejemplo se puede producir por daños en las superficies dentadas o el desbalance inadecuado causa fuerzas y vibraciones como resultado.

Con base en el nivel de análisis que pretendo en la tapa de prototipo de implantación de un sistema de monitoreo de vibraciones, se plantea realizar un énfasis en diagnóstico de problemas relacionado a desafinamiento y debátanse que puedan presentarse en los ejes y rodamientos, ya que este tipo de falla representa mantenimiento de orden mayor, además desde el 2014 han representado más de 500 horas de paro por averías.

Por lo cual, para este caso en particular se optó con tomar mediciones en dos direcciones de manera tan que se pueda colocar dos Acelerómetros en rodamiento principal y además de monitorear el lado de alta de la caja multiplicadora, logrando de esta manera un diagnóstico integral de los elementos rotativos implicados en la generación eléctrica.

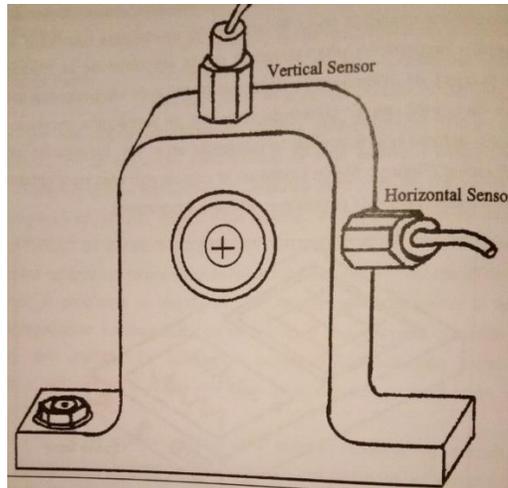


Figura 4.14 Direcciones de medición seleccionadas.

**Fuente:** Norma ISO 10816-21 (2015).

Además, para ratificar la ubicación de los acelerómetros se contó con la visita del Ingeniero Arturo Moya asesor técnico, el cual se apersono a la zona de trabajo del equipo con lo cual se pudo asegura la disponibilidad de espacio y limitaciones que se pudiera encontrar por la naturaleza de los equipos en los cuales se empleara el sistema. De tal manera que la distribución por la cual se implementara es:

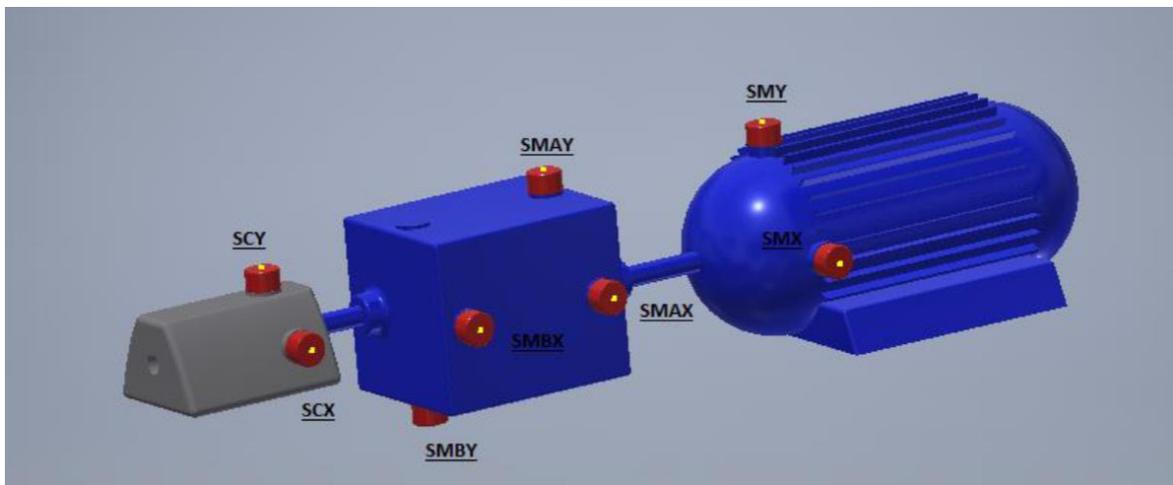


Figura 4.15 Ubicación de los Acelerómetros los elementos del aerogenerador.

**Fuente:** (inventor, 2017).

En la tabla que se presenta a continuación se describe la notación que se implementara para los Acelerómetros a lo largo de la implementación del sistema de monitoreo:

Tabla 4.5 Simbología implementada para la denotación de los Acelerómetros.

<b>Simbología Acelerómetros</b>	<b>Descripción</b>
<b>SCY-05</b>	Acelerómetro vertical en el caballete.
<b>SCX-05</b>	Acelerómetro horizontal en el caballete.
<b>SMBY-05</b>	Acelerómetro vertical en el lado de baja de la multiplicadora.
<b>SMBX-05</b>	Acelerómetro horizontal en el lado de baja de la multiplicadora.
<b>SMY-05</b>	Acelerómetro vertical en el generador.
<b>SMX-05</b>	Acelerómetro horizontal en el generador.
<b>SMAX-05</b>	Acelerómetro horizontal en el lado de alta de la multiplicadora.
<b>SMAY-05</b>	Acelerómetro vertical en el lado de alta de la multiplicadora.

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

### 4.3 Instalación de los Acelerómetros.

Para llevar a cabo la instalación de los Acelerómetros de cómo se presenta en la figura 4.15, se deben de tomar en cuenta algunos factores y limitantes que se presentan debido a las característica únicas del equipo donde se instalará, entre las consideraciones se debe de considerar tenemos:

- 1) Los Acelerómetros se deben de colocar de manera que queden de forma radial con respecto a los ejes de los equipos a los cuales se les va a realizar una medición.
- 2) Los Acelerómetros verticales y horizontales se debe de colocar de manera que queden a 90° uno con respecto al otro.
- 3) Dado que el espacio físico donde se van a instalar es dentro del góndola del aerogenerador, donde se encuentra una serie de equipos, además

dentro de este espacio deben interactuar los técnicos para realizar diferentes tareas de mantenimiento, se deben de colocar de manera que permanezcan resguardos del desplazamiento de los diferentes materiales que necesiten para realizar estas actividades.

- 4) Se deben de colocar en una superficie robusta, de tal manera que se evite la interferencia de elementos que puedan interferir con una adecuada obtención de los datos.

Con base en estas condiciones y basado en modelo de Acelerómetros propuesto en el modelo del Ingeniero Bryan Gerardo Bogantes Barrantes se presentó un problema, ya que por la características de los equipos había ubicaciones en la que se pretende la instalación de ellos no se cuenta con el espacio para realizar el orificio para su sujeción.

Además, en la caja multiplicadora se suma la condición que no se puede garantizar el espesor necesario para realizar el agujero sin que se produzca una fuga de aceite, lo que podría producir una avería que afecte la operación del aerogenerador.

Con base en esto se toma la tarea de encontrar una solución a dicho situación, de manera que se utilicen los acelerómetros que ya se adquirieron, además también se considera el hecho de que en caso de que se requiera el cambio de los acelerómetros o si se necesitan realizar la remoción del sensor para realizar otro tipo de labores, al volver a colocarlo se mantenga la uniformidad de los datos.

Con base en lo anterior se analizaron dos opciones que podrían resolver el problema, la primera sería la colocación de bases magnéticas las cuales presentan el inconveniente de que, dadas las condiciones no se tiene certeza de que soporten las condiciones ambientales o puedan desprenderse al realizarse otras actividades dentro de la góndola.

La segunda opción y la cual fue la que se implementó, se trató de bases que se puedan colocar en las superficies en la que se desea colocar el sensor, además

permite la remoción del mismo para realizar otras labores y permite volverlo a colocar de manera asertiva en el mismo punto de medición una vez terminadas estas labores.

En el mercado existen diferentes tipos de bases que permiten la colocación de los Acelerómetros dependiendo de los fabricantes, además de que el sistema que se instalar es un kit el cual cuenta con bases las cuales están hechas de un acero inoxidable.

Además, esta solución presenta una ventaja adicional de que una vez considerado la geometría y el material, no es necesario depender de un proveedor de equipo sino que se puede llevar a cabo mediante un maquinado con equipo adecuado.

Por lo cual se contrató el servicio de manufactura a la empresa Manufacture and Company S.A., ya que es un lugar de confianza el cual ya ha realizado diversos trabajos para el proyecto de generación del Parque Eólico los Santos, para que los confeccionara en base a la figura que se presenta a continuación, con un acero inoxidable 302.

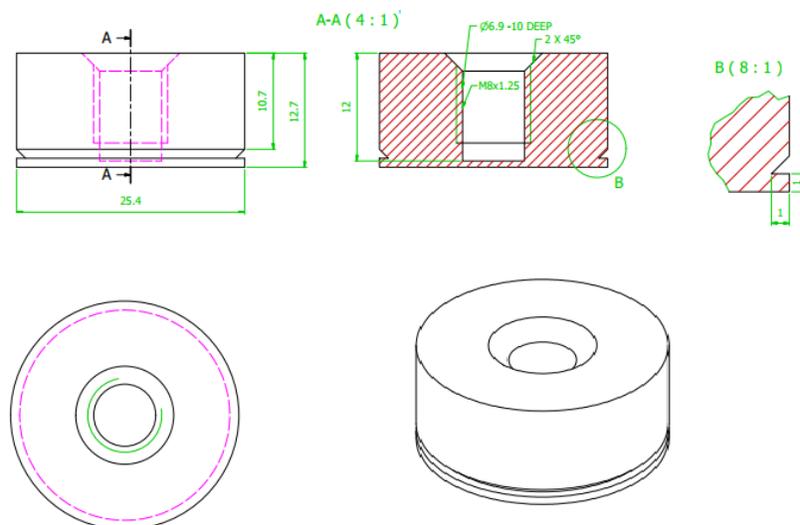


Figura 4.16 Geometría de las bases para la instalación de Acelerómetros.

**Fuente:** (inventor, 2017)

Dada la conveniencia de esta solución se implementó para los ocho Acelerómetros y no solo los que se colocaron en la caja multiplicadora, de manera tal que no se vea afectada la integridad de ninguno de los elementos en los cuales se pretende colocar los Acelerómetros.



Figura 4.17 Bases para Acelerómetros de acero inoxidable 302.

**Fuente:** Fotografía Propia.

Para la colocación de este tipo de elementos se requiere de adhesivos que son mecanismos de unión entre las superficies de los sustratos, indiferentemente si son del mismo o diferente material. El mecanismo mediante el cual se realiza la unión depende de fuerza de unión del adhesivo al sustrato y fuerza interna del adhesivo. La fuerza del adhesivo depende de la capacidad para lograr el máximo intercambio molecular y de las propiedades adhesivas de la superficie. Los fabricantes indican que los metales se pueden unir fácilmente.

Para esta aplicación el fabricante del kit de monitoreo d vibración realiza la recomendación de utilizar el adhesivo AA 330 de la marca loctite, con su activador el SF 7387.



Figura 4.18 Adhesivo AA 330 y Activador SF 7388 Loctite.

**Fuente:** (LOCTITE, 2017).

Dentro de las consideraciones al momento de utilizar este tipo de adhesivo se encuentran:

- 1) La presencia de agentes como óxido o el exceso de aceite, pueden afectar a la velocidad de curado y a la resistencia de la unión.
- 2) Disperse con brocha el activador en una de las superficies a adherir y el adhesivo a la otra superficie.
- 3) Cuando entre las superficies existen holguras mayores a  $>0,4$  mm, se recomienda aplicar el activador a ambas superficies.
- 4) El activador tiene un período latente de hasta 6 horas, período durante el cual se tiene que completar la unión de los sustratos.
- 5) Una vez realizada la aplicación del adhesivo se debe de llevar acabo la unión dentro de los 15 segundos posteriores.

6) Posteríos a la aplicación del adhesivo verifique la unión.

La velocidad del curado dependerá del tipo de sustrato que se esté utilizando, el comportamiento por material corresponde a la siguiente figura:

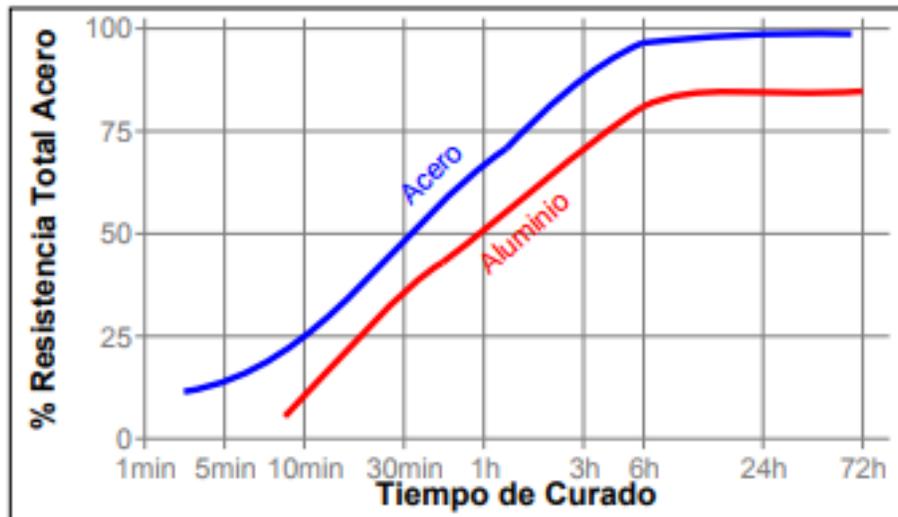


Figura 4.19 Velocidad de curado según el sustrato adhesivo AA 330 loctite.

Fuente: (LOCTITE, 2017).

Lo cual nos indica que para la aplicación para la que se desea emplear se requiere un periodo de curación de 24 horas para tener un 100% de la resistencia en la adhesión.

Lo que corresponde a la holgura se debe de reducir lo más posible para lograr el mayor porcentaje de la efectividad de la unión, en nuestra aplicación se implementó un moto-tool para asegurarse la menor holgura.

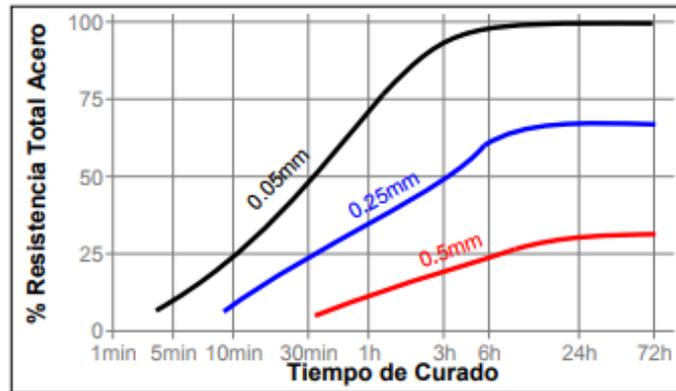


Figura 4.20 Velocidad de curado según la holgura para el adhesivo AA 330 loctite.

Fuente: (LOCTITE, 2017).

Para aprovechar al máximo la fuerza de adhesión se debe de dejar curando por 24 horas a 22°C con el activador 7387 y así obtener una resistencia a la cizalla dura mayor o igual a 2390 psi.

Dado que se pretende colocar las bases en la caja multiplicadora, es importante asegurarse de que el adhesivo soporte las temperaturas las cuales rondan los 80°C, con lo cual sustraemos de la gráfica que se presenta a continuación que soporta un tiempo de exposición mayor a 5000 horas.

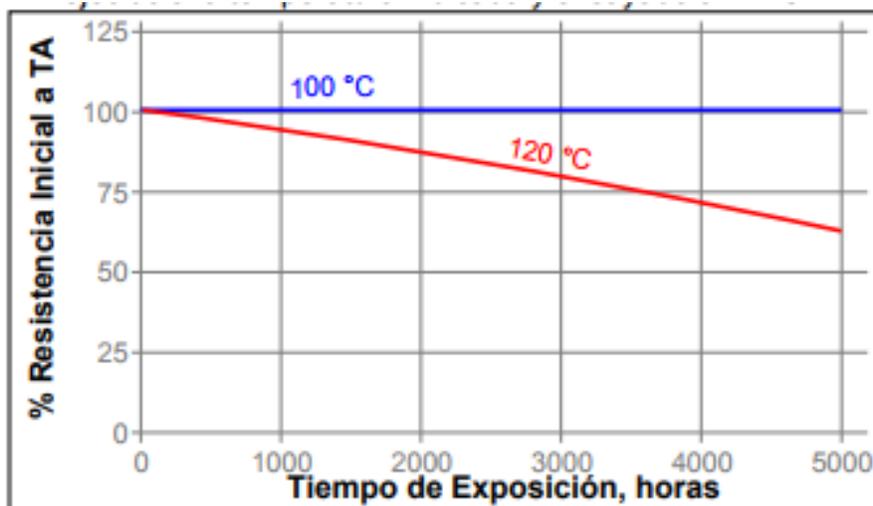


Figura 4.21 Envejecimiento térmico del adhesivo AA 330 loctite.

Fuente: (LOCTITE, 2017).

Con lo que corresponde al activador 7387 la aplicación es similar al adhesivo lo que se debe de tener presente es debe evitar que se mezclen directamente como líquidos activador y el adhesivo. Además de utilizar únicamente un lugar bien ventilado.

Conociendo las características del adhesivo que se recomienda, se realiza una búsqueda del producto en el medio local mediante diferentes proveedores, con lo cual se determina que a nivel de la región no se encuentra a la venta. Por lo cual se requiere de encontrar un adhesivo que sustituya al 330 de loctite, con características similares a las que se necesita en esta aplicación, ya que dicho adhesivo sólo se podría conseguir contra pedido y para lo cual se necesitaría adquirir una cantidad de producto mayor a la que se necesita, además de agregar un factor de tiempo mientras se realiza la importación.

Para lo cual se contacta con el Ingeniero Álvaro Piedra, el cual es el encargado de soporte técnico de Henkel a nivel de Costa Rica, analizando la aplicación en la que se requiere se recomienda la utilización del adhesivo AA 312 de loctite con el activar SF 736.



Figura 4.22 Adhesivo AA 312 y activador SF 376 loctite.

**Fuente:** Fotografía Propia.

Lo que corresponde a las atenciones que se deben de llevar acabo para la correcta utilización del adhesivo AA 312 son las mismas que para el AA 330.

Para referente del curado al igual que con el adhesivo 330 se requiere de un periodo de curado de más de 24 horas para obtener la máxima adhesión de los sustratos, la diferencia de este adhesivo recae en que es anaeróbico, lo cual significa que la adhesión inicia en el momento en que el oxígeno no está presente lo que nos da un mayor lapso de tiempo para realizar la maniobra de realizar la unión de los sustratos.



Figura 4.23 Velocidad de curado según el sustrato adhesivo AA 312 loctite.

**Fuente:** (LOCTITE, 2017).

Al igual que con el adhesivo AA 330 para aprovechar al máximo la fuerza de adhesión se debe de dejar curando por 24 horas a 22°C con el activador 376 y así obtener una resistencia a la cizalla dura mayor o igual a 2490 psi.

Bajo las mismas condiciones de operación de 80°C, el adhesivo AA 312 presenta un envejecimiento térmico de más de 5000 horas, sustraído del dibujo que se presenta a continuación.

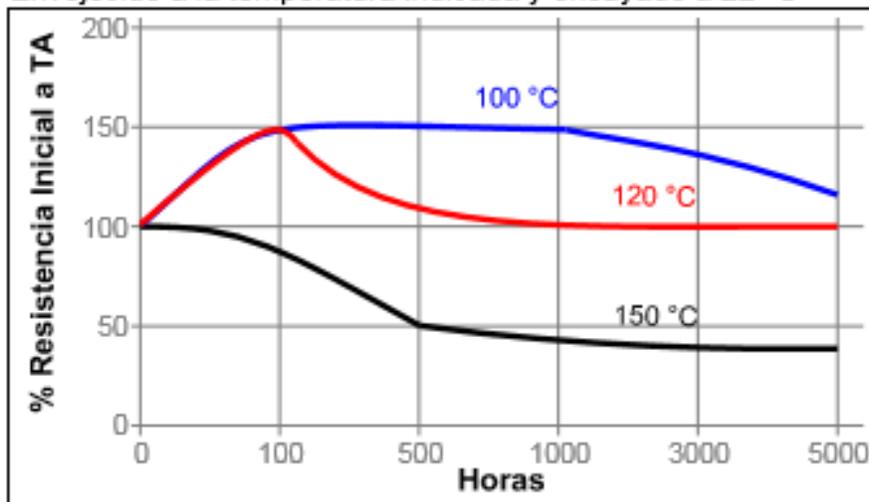


Figura 4.24 Envejecimiento térmico del adhesivo AA 312 loctite.  
Fuente: (LOCTITE, 2017).

Además, es importante mencionar que se aplicó el limpiador SF 7039 de loctite, tiene la función de limpiar superficies que estuvieron expuesto a humedad y otros contaminantes, también deja una capa repelente que permite la protección de la superficie.



Figura 4.25 Limpiador SF 7039 de loctite.  
Fuente: Fotografía propia.

Como parte del desarrollo del proyecto e incursionando en el uso de nuevas tecnología se logra coordinar con el distribuidor de LOCTITE Costa Rica el ingeniero Alvaro Piedra y la gerencia de Generación de COOPESANTOS, la prueba de un nuevo adhesivo híbrido HY 4060 GY y el HY4070 que está introduciendo al mercado costarricense, los cuales se presenta con propiedades de adhesión recomendados para este tipo de aplicación, que a diferencia de el adhesivo 312 posee holgura de trabajo de hasta 2 m. m.

Tabla 4.6 Presentación de adhesivos híbridos HY 4060 GY y HY4070



**Fuente:** Fotografía propia

Como parte del acuerdo de colaboración se deberá suministra pruebas escritas y fotográficas, de la aplicación del producto comportamiento con respecto al adhesivo 312.

#### 4.4 Comunicación del sistema de monitoreo de vibraciones.

La instalación de las electrónicas de monitoreo de vibraciones se da en el gabinete top, que es el que se encuentra en la góndola del aerogenerador número 5 del Parque Eólico los Santos, ya que se desea aprovechar el espacio con el que se cuenta, además facilita la alimentación debido que es en este lugar donde se encuentra la fuente de alimentación de 5A la cual será la que se utilice para energizar las dos electrónicas monitoreo.

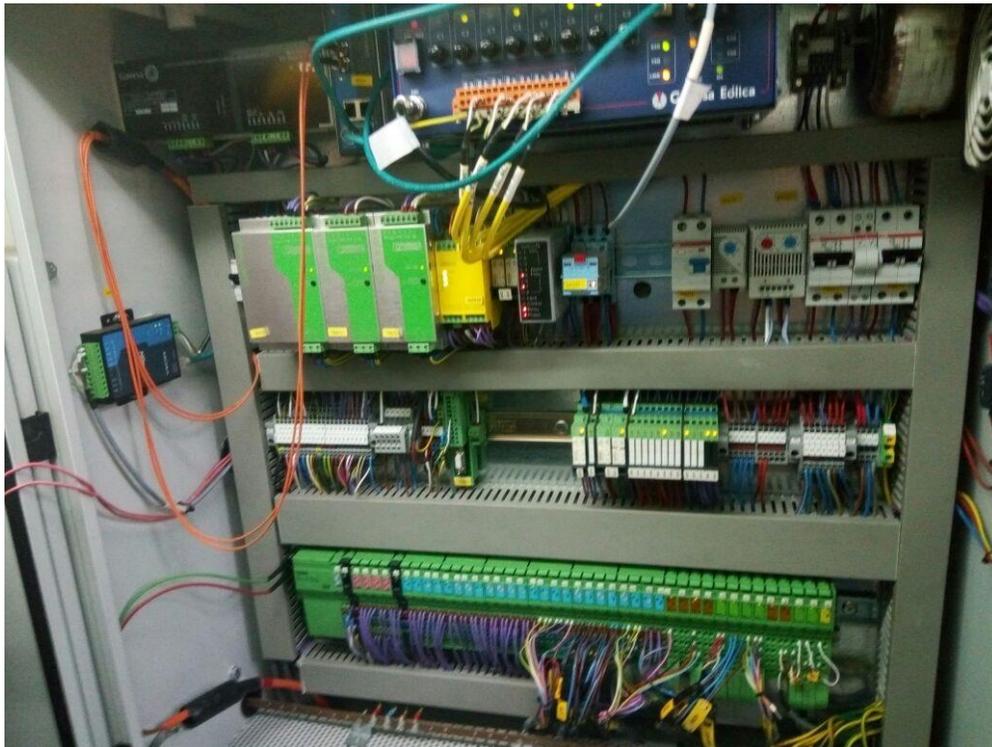


Figura 4.26 Gabinete Top de aerogenerador número 5.

**Fuente:** Fotografía propia.

Se emplea un cable de conexión Ethernet para conectar las electrónicas de medición, un switch modelo eds-308-mm-st de marca MOXA, el cual cuenta con seis entradas de Ethernet y dos salidas de fibra óptica multi modo. El multi modo presenta diámetros que se encuentran entre 50 a 100 micrones para el componente donde se presenta un transporte ligero de datos.



Figura 4.27 Switch eds-308-mm-st de marca MOXA

**Fuente:** (Industrial & Enterprise lot Solution, 2017).

Con el cable multi-modo baja por la torre por aproximadamente 44 metros hasta donde se encuentra el gabinete Ground, en el cual se encuentran los diferentes mecanismos de control de los aerogeneradores.

#### 4.5 Parametrización de la medición.

Como se plateo por el ingeniero Bryan Gerardo Bogantes Barrantes, se utilizaran los valores de la tabla 3.1, que se sustrajo de la norma ISO 10816-21 la cual impone ciertas características al a los equipos con los cuales se realizara la recolección de los datos entre los cuales se presenta:

- 1) Transductor de las vibraciones.
- 2) Amplificación de las mediciones,
- 3) La capacidad de filtrar la frecuencia operativa del equipo.
- 4) Poseer la capacidad de procesar la señal para la información del valor medio con sus equivalentes de energía de y la velocidad de vibración.
- 5) Permitir la formación del desplazamiento pico a pico en las mediciones de vibración del eje.

- 6) Transductor de las vibraciones.
- 7) Amplificación de las mediciones.
- 8) La capacidad de filtrar la frecuencia operativa del equipo.
- 9) Poseer la capacidad de procesar la señal para la información del valor medio con sus equivalentes de energía de y la velocidad de vibración.
- 10) Permitir la formación del desplazamiento pico a pico en las mediciones de vibración del eje
- 11) El equipo permita guardar la información y conocer el almacenamiento necesario.

De la misma manera nos clasifica los valores característicos en tres zonas de clasificación. Lo cual permite la evaluación cualitativa de los valores de vibración del componente de la aerogeneradores que se está analizando y suministrar la información sobre las acciones que se necesitan implementar. Las zonas en la que se dividen son tres las cuales son:

**Zona I:** el aerogenerador y los componentes cuyas mediciones caen dentro de esta región se consideran adecuados para operar de forma continua bajo estas tensiones de vibración.

**Zona II:** el aerogenerador y los componentes cuyas mediciones caen dentro de esta región regularmente no se consideran como adecuados para operación continua. Se recomienda realizar una investigación de la fuente de estas excitaciones y determinar si los valores son permitidos para un funcionamiento continuo, tomando en cuenta las condiciones de diseño y las condiciones de operación del equipo.

**Zona III:** los equipos que caen dentro de esta zona son generalmente considerados como peligrosos por lo que los daños en el aerogenerador y sus componentes podrían sufrir una falla.

Tomando en cuenta estas zonas y la tabla 3.1 determinamos los principales rangos de medición con los para diferentes elementos de los aerogeneradores, para este caso en particular corresponderán:

**Caja multiplicadora:** para mediciones de aceleración se presentan dos rangos de operación de frecuencia  $\leq 0,1$  Hz a 10 Hz y 10 Hz a 2000 Hz.

**Rotor:** las frecuencias de funcionamiento rangos  $\leq 0,1$  Hz a 10 Hz, en el dominio aceleración.

**Generador:** la frecuencias de funcionamiento 10 Hz a 5000 Hz, para análisis con aceleraciones.

En lo que se refiere a límites de alarma se desprenden por lo general de los aerogeneradores y sus componentes para que no sufran un desperfecto mecánico. Dependiendo de las características específicas del diseño de cada aerogenerador y a resistencia que presenta cada uno de sus componentes frente a la fuerzas dinámicas. Por lo cual los valores normales para todos los aerogeneradores con el mismo diseño. En general, los límites de alarma se encuentran dentro de las zonas II o III, sin embargo, se recomienda que los límites de alarma no excedan a 1,25 veces la zona límite I/ II.

En la tabla que se presenta a continuación contiene los valores de los rangos de frecuencia en la cuales va trabajar cada uno de los sensores, así como los valores de la aceleración en el límite I/II en metros sobre segundo al cuadrado que será el valor base para la configuración de las pre alarmas del sistema.

Tabla 4.7 Resumen de valores para la configuración de alarmas y frecuencia para los sensores.

<b>Simbología Sensores</b>	<b>Descripción</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Aceleración m/s<sup>2</sup></b>	<b>Pre alarma mg</b>	<b>Alarma mg</b>
<b>SCY-05</b>	Acelerómetro vertical en el caballete.	0,1 Hz a10 Hz	0,3	31	38
<b>SCX-05</b>	Acelerómetro horizontal en el caballete.	0,1 Hz a10 Hz	0,3	31	38
<b>SMBY-05</b>	Acelerómetro vertical en el lado de baja de la multiplicadora.	0,1 Hz a10 Hz	0,3	31	38
<b>SMBX-05</b>	Acelerómetro horizontal en el lado de baja de la multiplicadora.	0,1 Hz a10 Hz	0,3	31	38
<b>SMY-05</b>	Acelerómetro vertical en el generador.	10 Hz a 5000Hz	10	1019	1274
<b>SMX-05</b>	Acelerómetro horizontal en el generador.	10 Hz a 5000Hz	10	1019	1274
<b>SMAX-05</b>	Acelerómetro horizontal en el lado de alta de la multiplicadora	10 Hz a 2000HZ	7,5	765	956
<b>SMAY-05</b>	Acelerómetro vertical en el lado de alta de la multiplicadora.	10 Hz a 2000HZ	7,5	765	956

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

Para ingresar los datos de en la electrónicas de monitoreo recibe valores de aceleración en unidades de g (gravedad), donde  $1 \text{ m/s}^2 = 0,10193679918451 \text{ g}$  mediante esta conversión podemos realizar los cálculos de pre alarma y al mismo tiempo los parámetros de alarma ya que por recomendación de la norma ISO 10816 se puede utilizar un 25 % superior.

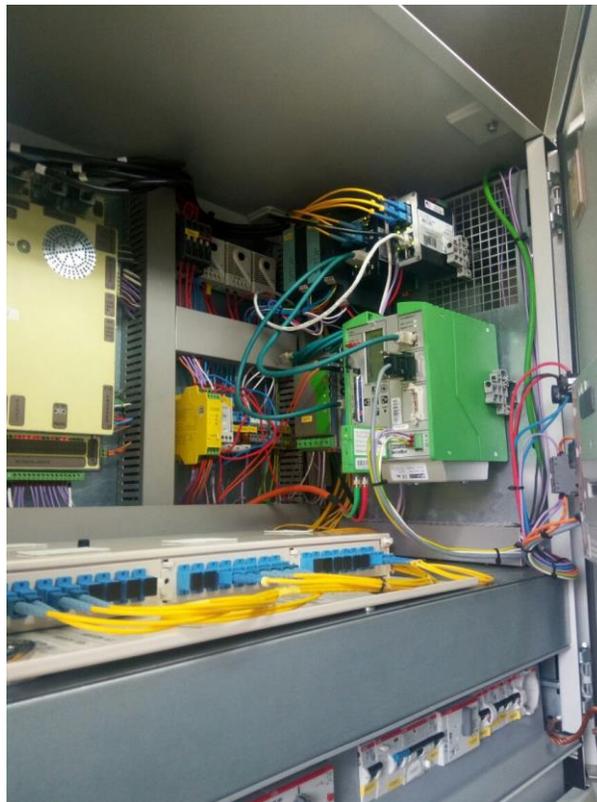


Figura 4.28 *Gabinete Ground de aerogenerador número 5.*

**Fuente:** Fotografía propia.

Una vez en el gabinete Ground el cable multi-modo la fibra óptica se conecta con el receptor PEL -MC-10/100 SMSC—EU, cual convierte las señales digitales de la fibra óptica a señales analógicas.



Figura 4.29 Receptor PEL -MC-10/100 SMSC—EU.

**Fuente:** (BEYONDTECH, 2018).

En el gabinete Ground se encuentra un computador industrial N-Tron 306FXE2-N-ST-15, el cual recopila las señales provenientes del PLC y la que se sustrae del receptor *PEL -MC-10/100 SMSC—EU*, el cual tiene una salida de fibra óptica de tipo mono-modo ste tipo de fibra óptica brinda una velocidad de transmisión más alta que puede alcanzar hasta 50 veces la distancia de multi-modo, claro que esto también representa una inversión mayor, al contar con un núcleo más pequeño la única onda de luz elimina cualquier tipo de distorsión que resultaría de los pulso de luz superpuestos, disminuyendo la atenuación de la señal y mejorando la velocidad de transmisión.



Figura 4.30 Computador industrial N-Tron 306FXE2-N-ST-15.

**Fuente:** (PRODUCTS FOR AUTOMATION, 2018).

Esta fibra óptica mono-modo está colocada de una forma predeterminada a lo largo de todo el Parque Eólico Los Santos hasta el edificio de control, donde se encuentra el servidor de monitoreo de la totalidad del parque, después de pasar por el convertidos se establece la salida número 12 donde se puede comprobar el estado de la electrónicas de monitoreo.

#### 4.6 Puesta en marcha de los equipos de monitoreo de vibración.

A lo largo del desarrollo del este documento se ha explicado las consideraciones que se llevan a cabo para lograr la configuración del equipo, así como el proceso mediante se han tomado de las decisiones para su instalación. Como se propuso al seleccionar el lugar en el cual se instalaron los acelerómetros para la fase del prototipo se centrara en tratar de identificar problemas asociados a los rodamientos y des alineamiento. En la tabla que se presenta a continuación se presenta en numera de MAC de las dos electrónicas, así como el número de posición acelerómetro y su respectiva simbología la cual se plante al inicio de este

documento, además de todo esto se plante la aplicación para la cual se programó cada uno de ellos.

Tabla 4.8 Numero Mac de las electrónicas y acelerómetros asociados a cada una de ellas.

Dirección Mac de la electrónica de monitoreo de vibraciones	Numero de acelerómetro	Simbología acelerómetros	Aplicación
<b>00:02:01:31:62:05</b>	1	SCY-05	RODAMIENTO BOLAS 6326 C3
	2	SCX-05	RODAMIENTO BOLAS 6326 C3
	3	SMBY-05	RODAMIENTO BOLAS 6326 C3
	4	SMBX-05	RODAMIENTO BOLAS 6326 C3
<b>00:02:01:31:62:0c</b>	1	SMY-05	Desbalance(GAMESA 850kw)
	2	SMX-05	Desbalance(GAMESA 850kw)
	3	SMAX-05	RODAMIENTO BOLAS 6326 C3
	4	SMAY-05	RODAMIENTO BOLAS 6326 C3

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

Se debe recordar que al poner en funcionamiento formal el equipo de monitoreo se debe de llevar acabo la conexión del acelerómetro de velocidad inductivo con el cual cuenta el aerogenerador en la electrónica, en una de sus entradas analógicas para poseer una referencia de velocidad ya que nuestra aplicación al no ser una operación a velocidad constante requiere una corroboración de la señal.

En esta fase es importante en el apartado de documentación con el nombre del equipo al que se le está realizando el estudio en nuestro caso el aerogenerador número 5, esto con motivo de que al realizar la exportación de los archivos que se generen se puedan catalogar de manera correcta, para esta fase se pretende que los datos sean exportados una vez al mes, como parte de una rutina de seguimiento establecida seguido de su almacenamiento en el servidor del parque eólico, para esta el plan piloto se pretende que la base de datos tenga una capacidad de 20 GB, esto por recomendación del asesor técnico de Genbus que a apoyado el desarrollo del proyecto.

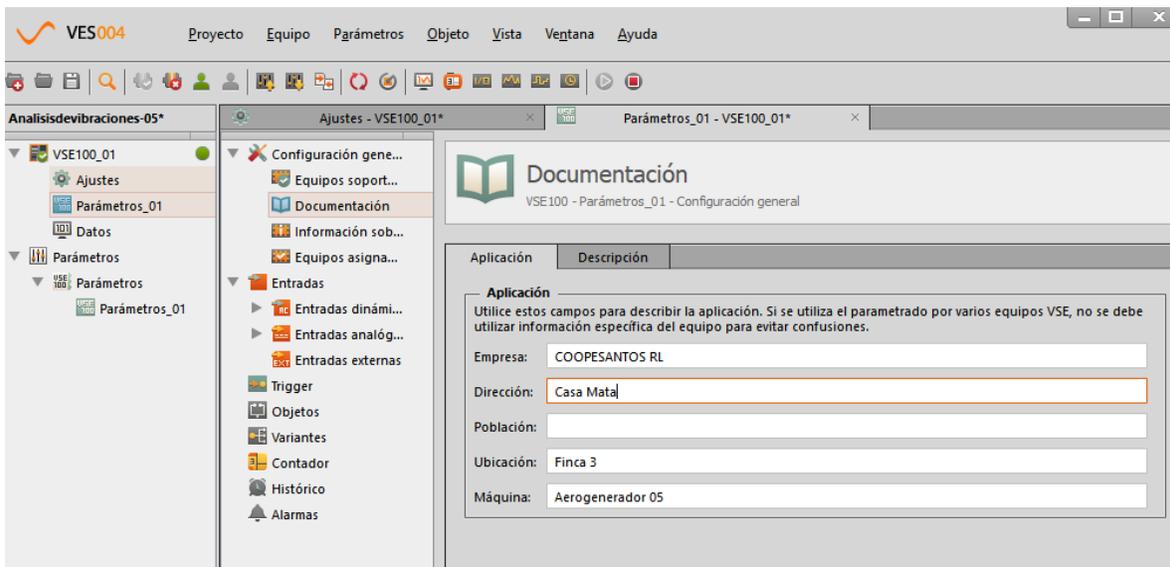


Figura 4.31 Captura de Pantalla de la pantalla de documentación.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Así mismo para la programación final de la implementación hay que realizar la salvedad, que el software, nos permite realizar la configuración de las dos

electrónicas dentro del mismo proyecto, lo que facilita el seguimiento del comportamiento del aerogenerador ya que permitirá realizar el monitoreo de los ocho puntos de medición con un fácil desplazamiento del cursor de la PC.

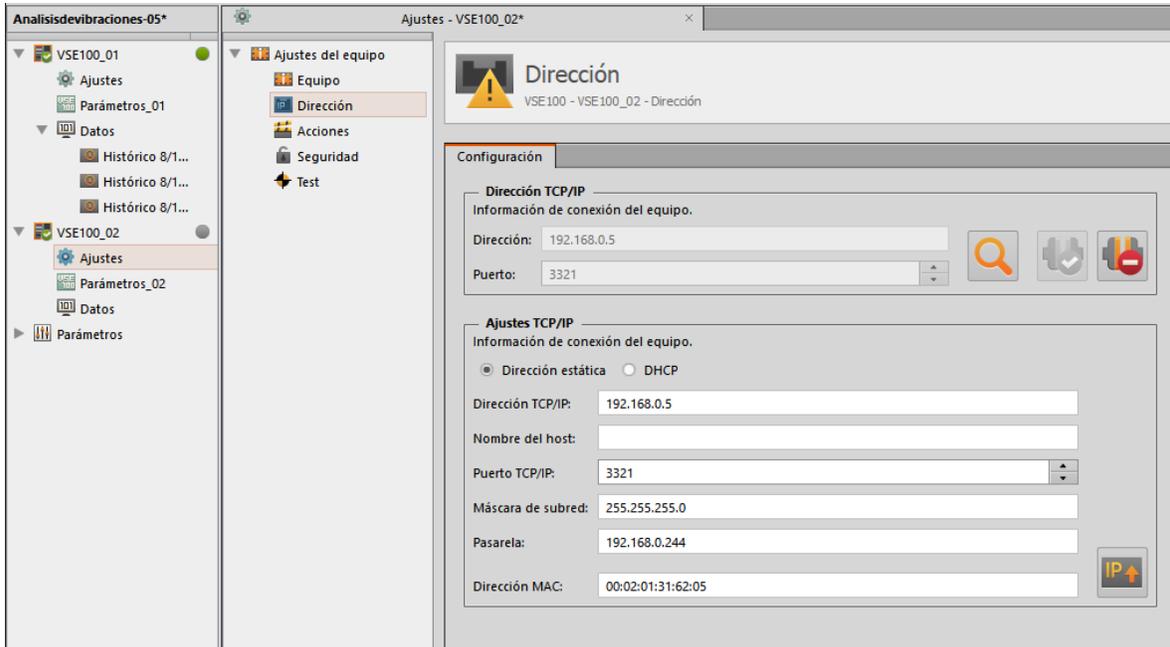


Figura 4.32 Configuración de dos electrónicas de monitoreo en un solo proyecto.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015)

Uno de los puntos que es impórtate que volvamos a mencionar el la configuración de los objetos que re refiera a cada uno de los sensores, dentro de los cuales dos son de suma importancia que son los valores del rango de la frecuencia y los valores lo límites para la colocación de alarmas, según se enumera en la tabla 4.6.

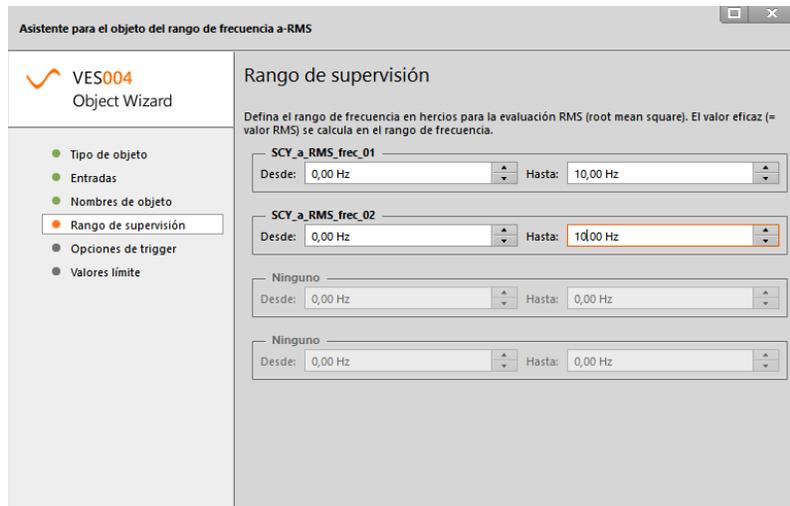


Figura 4.33 Muestra de programación de las frecuencia de para los acelerómetros.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Seguendo con la metodología de configuración se establecen los cuatro objetos, uno por cada uno de los acelerómetros que se colocaron en las electronicas.

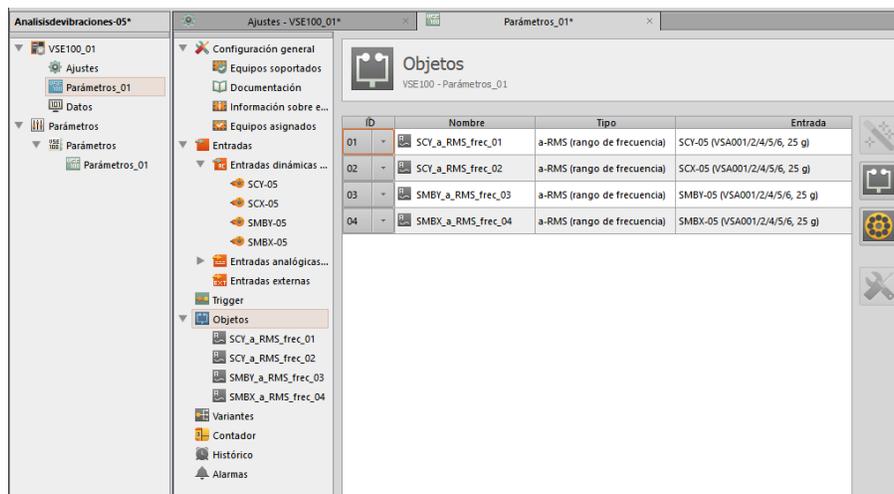


Figura 4.34 Muestra de programación de los objetos para los acelerómetros.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

## 4.7 Análisis Financiero.

En este capítulo se presentarán los costos asociados a la implementación de un sistema de monitoreo de condiciones basados en vibraciones del aerogenerador número 5 del PELS. Por lo cual se tomará en cuenta los gastos de los equipos adquiridos y productos que se consumieron en la implementación.

Por lo cual en este análisis no se tomará en cuenta el tiempo que se tardó en la investigación y pruebas que se realizaron para la implementación.

En la siguiente tabla se presenta la descripción de los equipos y productos empleados, así como de los costos que representaron para la implementación del sistema de monitoreo de vibraciones, los órdenes de compra se adjuntarán en la sección de Anexos para la ratificación de la información. Los cuales comprenden las 7 horas de que gastaron dos técnicos en la instalación de los equipos y la energía que no se percibió por detener el equipo el lapso que se detuvo el equipo.

Tabla 4.9 Gastos asociados a la Instalación del Sistema de Monitoreo de Vibración.

Descripción de los recursos	Costo
<b>Kit de monitoreo de vibración marca ifm (se tomara una referencia \$ 1= ₡ 570)</b>	₡ 3.089.400,00
<b>Bases para Acelerómetros de monitoreo de vibraciones según plano de diseño.</b>	₡ 84.000,00
<b>Kit de adhesivo para la colocación de las bases.</b>	₡ 28.871,50

<b>Energía no producida.</b>	₡	17.155,00
<b>Mano de obra.</b>	₡	24.360,00
<b>Total</b>	₡	3.243.786,50

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

Alejandro J. Pistarelli establece en su libro “Manual de Mantenimiento Ingeniería, Gestión y Organización”, una serie de cálculos en los cuales se realiza una comparación de los costos que representa una maquina con y sin mantenimiento de condición.

En el cual el costo total por mantenimiento condicional es:

$$C_{TPR} = C_{PR} \times \frac{H}{t_{PR}} + C_{Rest} \times \frac{H}{MTBFs}$$

Por su parte, el costo total sin mantenimiento condicional es:

$$C_{Tff} = (C_{Rest} + C_{ad} + C_{bm}) \times \frac{H}{MTBFs}$$

La justificación económica de la tarea condicional, se realiza sin considerar a  $C_{Rest}$  y el horizonte (H), y comparando lo siguiente:

$$(1) \frac{C_{PR}}{t_{PR}} \Leftrightarrow \frac{(C_{ad} + C_{bm})}{MTBFs} \quad (2)$$

Para realizar los cálculos se toma como referencia las pérdidas de producción en un mes de alta producción y los costos asociados se referencia a los costos en una tarea correctiva realizada en órdenes de trabajo anteriores.

Tabla 4.10 Descripción de índices para el cálculo del costo de MBC.

Tipo de Mantenimiento basado en Condición	TMC	Vibración
Horas hombre facilitadas por la empresa	HHF	₡ 12.829,00
MO, Mat., Lucro Cesante	MOMATLC	₡ 12.829,00
Costo unitario Por Realizar la tarea condicional	CPR	₡ 12.829,00
Horizonte de análisis(años)	H	1
Intervalo de tiempo entre intervenciones condicionales	Tpr	0,12
Costo de restauración correctiva (repuestos + mano de obra + pérdidas de producción)	CRest	₡ 5.153.041,00
Tiempo medio entre fallas sintomática(años)	MTBFs	5
Costo Total Por Realizar el Mantenimiento basado en Condición durante el horizonte de evaluación H	CTPR	₡ 1.137.516,53
Costo adicionales (Costo de mantenimiento mayor)	Cad	₡ 2.755.683,00
Costo de beneficio marginal (mismas consideraciones de Mantenimiento Preventivo)	Cbm	₡ 2.397.358,00
Costo Total de fallas funcionales (sin realizar Mantenimiento basado en Condición)	CTff	₡ 2.061.216,40
	(1)	₡ 106.908,33
	(2)	₡ 1.030.608,20

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

Para determinar la viabilidad de la aplicación de este sistema en el parque eólico debemos de conocer el impacto que representaría en una avería, para los procesos de generación de energía la estación en la cual se produzca la falla. En la figura que se presenta a continuación se presenta la tendencia de producción hasta enero del 2017.

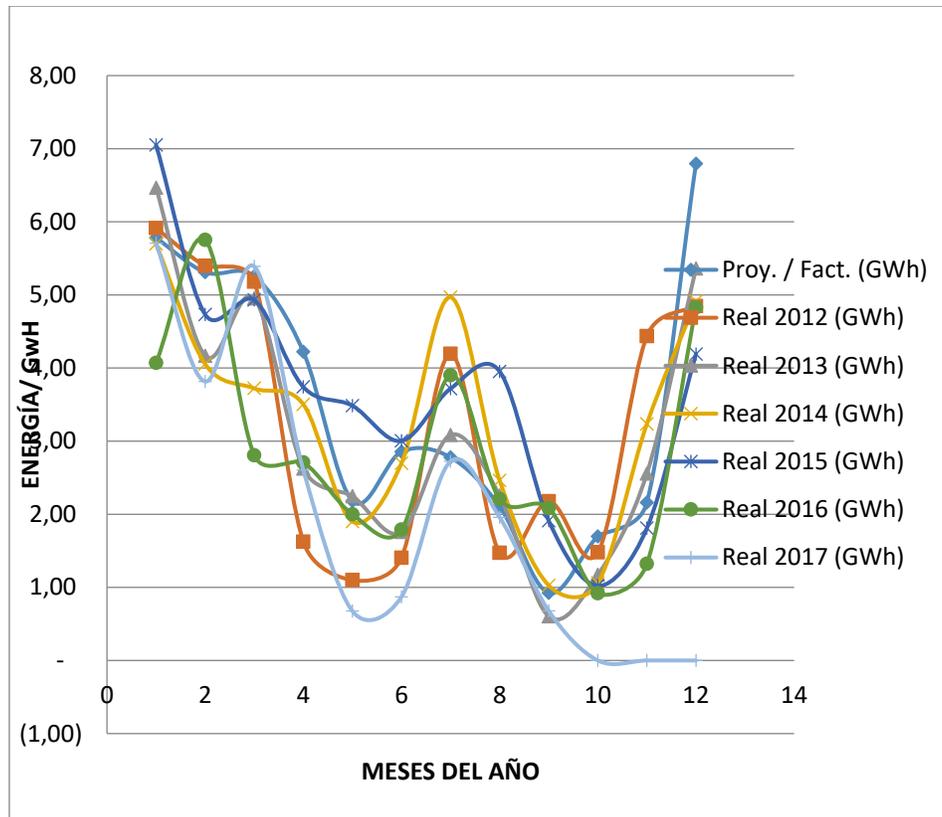


Gráfico 4.3 Control De Generación del parque Eólico Los Santos

Fuente: COOPESANTOS (2017).

El gráfico anterior se puede sustraer que la generación en los meses de agosto a noviembre son los de menor producción.

De esta manera podemos realizar la comparación de una falla no programada que se presentó por fallar en un rodamiento que se presenta en la orden de trabajo OT00085 en el aerogenerador número 5 estuvo detenido por un periodo de 202 horas, entre la fecha de 12/3/2015 a las 7:00 al 20/3/2015 a las 17:00 lo cual representa una pérdida de generación 96 657,44 Kwh, lo que representa a ₡7 119 528.67, si se compara con la actividades realizadas en el aerogenerador número 12 en la orden de trabajo OT000489, las cuales se llevaron a cabo antes de que el problema de los rodamiento causarían daños a otros elementos de los aerogeneradores y una duración de 100 horas, si se realizar la corrección de la

falla en el mismo lapso de tiempo ya que las actividades establecidas en ambos órdenes de trabajo son similares, solamente en generación de energía 33 235.94 Kwh, lo que representa un ahorro de ₡2 397 358.66.

Además, si se logra realizar un análisis más detallado para el diagnóstico con monitoreo de vibraciones, de manera que se realice la intervención en una temporada baja de producción como fue un mes setiembre en el mismo plazo de 100 horas habría una pérdida de solamente 1 668.43 Kwh, lo que equivaldría a solamente a ₡ 76 304.49.

De esta tal manera si se puede realizar un correcto uso de mantenimiento de condición, se necesitaría la una intervención adecuada para recuperar la inversión que se debe realizar para instalar este tipo de sistemas de monitoreo de vibraciones.

#### 4.8 Resultados

Como producto de la instalación y programación del equipo de monitoreo por análisis de vibraciones obtenemos la posibilidad apreciar la presentación de los datos Brutos mediante un gráfico de líneas para cada uno de los acelerómetros.

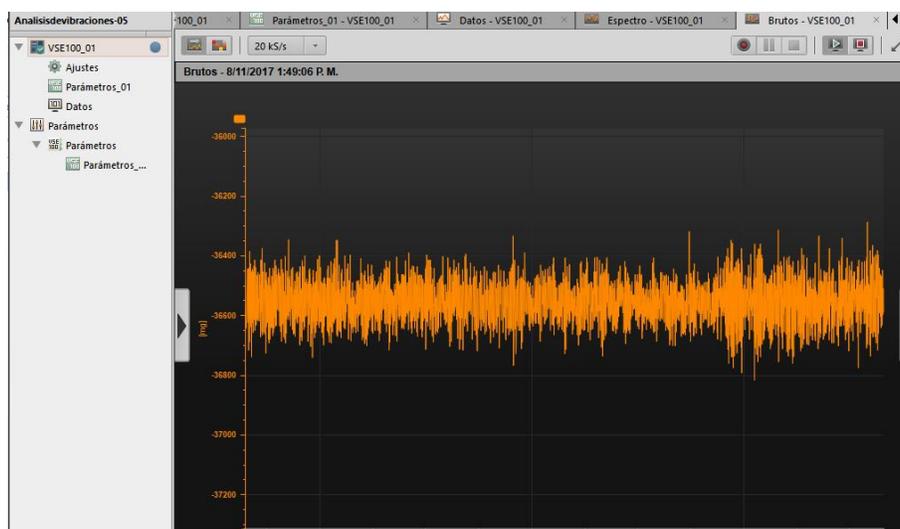


Figura 4.35 Gráfico de líneas de los datos en bruto de los acelerómetros.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Además, nos permite realizar el monitoreo del comportamiento de los cuatro acelerómetros simultáneamente, además, nos lo presenta de forma tal que sea fácil determinar si se encuentra en un funcionamiento normal o se presenta anomalías en el funcionamiento normal de los equipos.

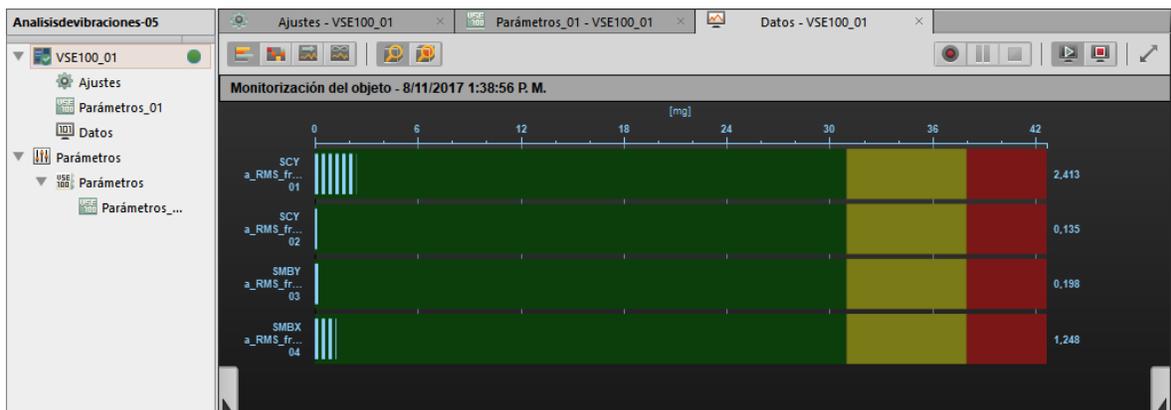


Figura 4.36 Visualización del comportamiento de vibración de los elementos sensados.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Una de las herramientas más valiosas para realizar un análisis de vibraciones es la presentación de los datos mediante un espectro, el cual presenta los datos mediante la FFT para cada uno de los acelerómetros, lo cual nos brinda la capacidad de realizar un análisis individual de cada uno de los puntos de medición.

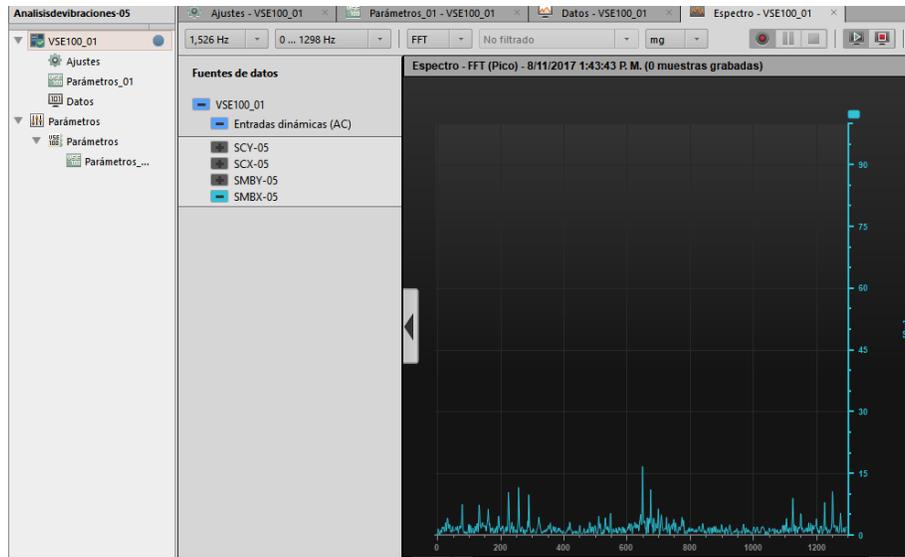


Figura 4.37 Espectro de medición de acelerómetro SMBX.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Además, nos permite guardar un historial de las mediciones, las cuales se pueden acceder para poder ver el comportamiento que ha presentado en un determinado lapso de tiempo, en cada uno de los acelerómetros instalados.

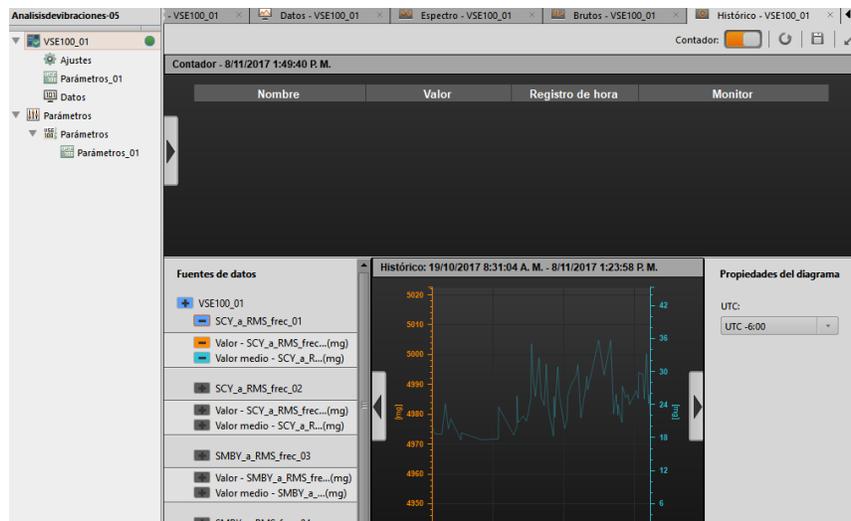


Figura 4.38 Representación de los datos históricos del acelerómetro SCY.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Además, nos permite realizar la exportación de los datos en un archivo de txt, los cuales se pueden utilizar para realizar otro tipo de análisis como es el análisis de redes neuronales que se es está desarrollando en el Parque Eólico Los Santos. Una de las ventajas que podemos observar en diferentes colores el estado de las mediciones permitiendo identificar los sucesos anormales que se han presentado y poder así iniciar el estudio de la anomalía para determinar sus posibles causas

Date	Time	Value	Average	Rotational Speed	Reference Value	Flags
19/10/2017	8:31:03 a. m.	0,363879	0,103254			Parameter changed   Baseline changed
19/10/2017	9:02:50 a. m.	3,061167	0,110200			
19/10/2017	9:42:08 a. m.	0,943322	0,104117			
19/10/2017	9:57:44 a. m.	0,230419	0,103586			
19/10/2017	11:06:39 a. m.	1,073051	0,104623			Parameter changed   Baseline changed
19/10/2017	11:55:10 a. m.	3,130778	0,104359			
19/10/2017	12:03:00 p. m.	0,430674	0,102664			
19/10/2017	12:29:52 p. m.	0,193453	0,102592			
19/10/2017	1:25:51 p. m.	7,100376	0,105380			
19/10/2017	1:41:10 p. m.	0,290284	0,103160			
19/10/2017	2:11:37 p. m.	1,529397	0,105783			
19/10/2017	2:30:51 p. m.	0,216355	0,103284			
19/10/2017	3:20:34 p. m.	0,277467	0,103827			
19/10/2017	3:30:50 p. m.	0,124540	0,102728			
19/10/2017	4:05:25 p. m.	0,277331	0,103048			
1/11/2017	1:02:47 p. m.	0,009974	0,005719			
1/11/2017	1:17:16 p. m.	0,006970	0,003349			
1/11/2017	2:13:12 p. m.	73,001747	0,202953			
1/11/2017	2:39:07 p. m.	0,103159	0,094952	6.000,000000	0,000000	Parameter changed   Baseline changed
1/11/2017	3:26:24 p. m.	0,237731	0,112671	6.000,000000	0,000000	
1/11/2017	3:34:31 p. m.	0,248264	0,154216	6.000,000000	0,000000	

Figura 4.39 Ejemplo de la presentación de los informes de histora.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

## CAPÍTULO 5: Finalización.

---

### 5.1 Conclusiones.

- 1) Se determinaron los puntos de colocación de los acelerómetros que satisfaga, el modelo de redes neuronales planteado por Ingeniero Bryan Bogantes Barrantes, la norma ISO 10816 y las condiciones presentes en el sitio de operación.
- 2) La colocación del acelerómetro se llevó acabo sin realizar una invasión de los elementos del aerogenerador, mediante la implementación de bases de acero inoxidable y adhesivos industriales.
- 3) Se configuró el software de parametrización del equipo que se adquirió para el aerogenerador con base en la norma ISO 10816, rangos de medición, configuración de alertas y conexión de los equipos.
- 4) Se estudió la red de comunicación de los aerogeneradores y se logró implementar la comunicación del sistema de monitoreo de vibraciones colocado el aerogenerador con el servidor ubicado en el edificio de mantenimiento.
- 5) Tras la pruebas de funcionamiento, comunicación e instalación se logró dejar implementado un sistema de monitoreo de vibraciones para el aerogenerador número 5 del Parque Eólico Los Santos, modelo G52/850 de marca GAMESA.
- 6) Mediante la metodología presentada el libro “MANUAL DE MANTENIMIENTO. INGENIERÍA, GESTIÓN Y ORGANIZACIÓN”, se logró corroborar la viabilidad de aplicar mantenimiento de condición en el aerogenerador número 5 del Parque Eólico Los Santos, modelo G52/850 de marca GAMESA.
- 7) Mediante el análisis de las pérdidas de producción producidas por problemas de rodamientos, se corroboró el impacto positivo que representaría la adecuada implementación de un mantenimiento basado en condición.

## 5.2 Recomendaciones.

- 1) Se recomienda aprovechar la relación con COOPELESCA para solicitar una medición de vibraciones con un equipo portátil para corroborar los datos, que se obtienen con el equipo instalado.
- 2) Dado que se colocaron bases con diferentes adhesivos, se recomienda realizar inspecciones para comparar el comportamiento de los adhesivos y determinar cuál es el que tiene mejor reacción a las condiciones de trabajo, para utilizarlo en la expansión del proyecto al resto del parque.
- 3) Capacitar un colaborador de la parte de mantenimiento del Parque Eólico Los Santos en las competencias necesaria para la interpretación de datos de vibraciones, para poder sustraer el mayor provecho del equipo instalado.
- 4) Evaluar la viabilidad de implementar este sistema en todos los aerogeneradores que comprende el parque eólico los Santos.
- 5) Dar continuidad a la metodología de redes neuronales para determinar la vida útil de un equipo, el cual fue el que dio origen a esta práctica y la cual puede seguir desarrollándose con la ayuda de un estudiante de Ingeniería en Mantenimiento Industrial en Práctica Profesional.

# CAPÍTULO 6: Anexos.

## 6.1 Orden de compra de sistema de monitoreo.

Sistema de Gestión de calidad Coopesantos R.L.  
Revisión: 30/09/2010

DF-07 Orden de compra local



COOPESANTOS, R.L. C.J.No.: 3-004-045260  
**COOPERATIVA DE ELECTRIFICACIÓN RURAL LOS SANTOS, R.L**  
 Telefono: 2546-25-25, Fax: 2546-61-73  
[proveeduria@coopesantos.com](mailto:proveeduria@coopesantos.com) Apartado No. 003-8055

**ORDEN DE COMPRA LOCAL MAYOR No.: OC\_PPRV-3132**

**A: Genbus General Business**

Fecha: 20/07/2017

Cuenta No Gasto Generación de Energía (Gastos Nuevos)

Sirvase a suministrar a: **Jeffrey Luna Galera**

Por cuenta de esta Cooperativa lo siguiente:

ITEM	CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCION	MONTO UNITARIO	MONTO TOTAL
1	8	CU	Conector hembra , recto , M12 , 5polos , 5-hilos , AC/DC , Tensión de alimentación: 30 V AC / 36 V DC , Para sensores con Conector M12 , 15 m , cable PUR , 5 x 0,25 mm²	\$41,00	\$328,00
2	2	CU	Electrónica de diagnóstico para detectores de vibraciones , Carcasa de plástico , Tensión de alimentación: 24 V DC ± 20 % , Consumo: 200 mA	\$1.143,00	\$2.286,00
3	2	CU	Cable de Programación recto / recto , RJ45 , 8polos , 8-hilos , Cable de interconexión , conector RJ45 / conector RJ45 , 2 m , cable PVC , Ethernet , Cable cruzado de interconexión	\$29,00	\$58,00
4	8	CU	Acelerómetro , Rango de medición: ± 25 g , Tensión de alimentación: 7,2...10,8 V DC , Consumo: 15 mA , Conexión por conector , Conector M12 , para la conexión a electrónicas de diagnóstico externas tipo VSE	\$252,00	\$2.016,00
5	1	CU	Software de Parametrización para VSExxx und VNBxxx -----UL-----	\$109,00	\$109,00
Observaciones:				Sub Total	\$4.797,00
				Descuento	\$0,00
				Impuesto Ventas	\$623,61
Según proforma 1706201. Garantía; 5 años. Tiempo de entrega; 2 semanas. Incluye asistencia para instalación de equipo. Penalización: se penalizará con 0.2% por día hábil por incumplimiento en la fecha de entrega hasta un 25 % del total de la orden de compra.				Total	\$5.420,61

  
Proveduría

  
Dirección Financiera

Trámite de Pago: Al hacer entrega de los artículos debe exigirse "Certificado de recibo" de la bodega correspondiente, presentar facturas en duplicado (original y copia). Las facturas deben tener anotado el No. de la orden de compra que las cubre, la cual no tendrá validez si presenta borrones o tachaduras ESTE DOCUMENTO NO ES NEGOCIABLE.

Usuario.: monicar

6.2 Orden de compra para el kit de adhesivos.

Sistema de Gestión de calidad Coopesantos R.L.  
Revisión: 30/09/2010

DF-06 Orden de compra local



COOPESANTOS, R.L, C.J.No.: 3-004-045260

COOPERATIVA DE ELECTRIFICACIÓN RURAL LOS SANTOS, R.L

Telefono: 2546-25-25, Fax: 2546-61-73

proveeduria@coopesantos.com Apartado No. 003-8055

**ORDEN DE COMPRA LOCAL MENOR No.: OC\_PPRV-3462**

**A: STI SUPLIDORA TECNICA INDUSTRIAL LIMITADA**

Fecha: 18/10/2017

Cuenta No Gasto Generación de Energía (Gastos Nuevos)

Sírvase a suministrar a: Jeffrey Luna Galera

Por cuenta de esta Cooperativa lo siguiente:

ITEM	CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCION	MONTO UNITARIO	MONTO TOTAL
1	1	CU	ADH ESTRUCTURAL 312-31 50ML IDH 135398	¢15.750,00	¢15.750,00
2	1	CU	ACTIVADOR LOCT. 73656 NF 6 OZ IDH 13553	¢4.900,00	¢4.900,00
3	1	CU	LIMP CONTACT ELECT 7039 FLAMABLE IDH 30	¢4.900,00	¢4.900,00
-----UL----- Términos de pago: 30 DIAS					
Observaciones:  Según proforma CO-069993. Tiempo de entrega: 1 día.				Sub Total	¢25.550,00
				Descuento	¢0,00
				Impuesto Ventas	¢3.321,50
				Total	¢28.871,50

  
Monica Roblés Valverde

Trámite de Pago	Al hacer entrega de los artículos debe exigirse "Certificado de recibo" de la bodega correspondiente, presentar facturas en duplicado (original y copia). Las facturas deben tener anotado el No. de la orden de compra que las cubre, la cual no tendrá validez si presenta borrones o tachaduras ESTE DOCUMENTO NO ES NEGOCIABLE.
-----------------	---

Usuario.: monicar

### 6.3 Orden de compra para la bases para montaje de Acelerómetros.

Sistema de Gestión de calidad Coopesantos R.L.  
Revisión: 30/09/2010

DF-06 Orden de compra local



COOPESANTOS, R.L, C.J.No.: 3-004-045260

COOPERATIVA DE ELECTRIFICACIÓN RURAL LOS SANTOS, R.L  
Telefono: 2546-25-25, Fax: 2546-61-73

proveeduria@coopesantos.com Apartado No. 003-8055

**ORDEN DE COMPRA LOCAL MENOR No.: OC\_PPRV-3460**

**A: Manufacture and Service Company S.A**

Fecha: 18/10/2017

Cuenta No Gasto Generación de Energia (Gastos Nuevos)

Sírvase a suministrar a: **Olger Robles Solano**

Por cuenta de esta Cooperativa lo siguiente:

ITEM	CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCION	MONTO UNITARIO	MONTO TOTAL
1	8	C/U	Bases para sensores de monitoreo de vibraciones según plano de diseño	¢10.500,00	¢84.000,00
2	5	C/U	Piezas para pararrayos aspas  -----UL----- Términos de pago: TRAMITE FACTURA	¢16.500,00	¢82.500,00
Observaciones:				Sub Total	¢166.500,00
Según proforma 009.				Descuento	¢0,00
				Impuesto Ventas	¢21.645,00
				Total	¢188.145,00

Mónica Roblés Valverde

Tramite de Pago	Al hacer entrega de los artículos debe exigirse "Certificado de recibo" de la bodega correspondiente, presentar facturas en duplicado (original y copia). Las facturas deben tener anotado el No. de la orden de compra que las cubre, la cual no tendrá validez si presenta borrones o tachaduras ESTE DOCUMENTO NO ES NEGOCIABLE.
-----------------	---

## 6.4 Reportes de no producción de energía durante la instalación de los Acelerómetros.

Consecutivo : 00022

FECHA DEL REPORTE: 4/11/2017

Generar Reporte

Dirección de Energía  
Departamento De Generación  
Parque Eólico Los Santos  
Línea de Producción

**COOPESANTOS P.L.**  
Fuente de Progreso y Bienestar

**REPORTE DE ENERGÍA Y POTENCIA NO GENERADA POR AVERÍAS O DETENCIÓN DE AEROGENERADORES**

MÁQUINA DETENIDA : AE06

DATOS REFERIDOS DE LA MÁQUINA : AE06

FALLA O MOTIVO DE DETENCIÓN :  
Energía No Generada por instalación de bases para sensores.

PERIODO DE DETENCIÓN : 31/10/2017 8:30 AL 31/10/2017 18:00 Horas Equivalentes 3,6

PERIODO DEDUCIBLE: 31/10/2017 8:30 AL 20/11/2017 8:30

PERIODO DE COBERTURA 20/11/2017 8:30 AL 31/10/2017 18:00

DATOS ENERGÉTICOS:	
ENERGÍA TOTAL EN EL PERIODO DE DETENCIÓN (kWh):	2,88
ENERGÍA TOTAL EN EL PERIODO DEL DEDUCIBLE (kWh):	2,88
ENERGÍA TOTAL EN EL PERIODO DE COBERTURA (kWh):	-

DATOS DE POTENCIA	
FECHA Y HORA DE LA MÁXIMA POTENCIA DE LA COOPERATIVA	
PUNTA :	
VALLE:	

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN EL PERIODO DE DETENCIÓN:				
PERIODO	kWh	TARIFA	TOTAL	TOTAL
PUNTA	2,88	66,00	194,80	194,60
VALLE	-	66,00	-	
NOCHE	-	39,00	-	

MARCA DENTRO DEL PERIODO DE AVERÍA	
PUNTA :	NO
VALLE:	NO

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN EL PERIODO DEL DEDUCIBLE:				
PERIODO	kWh	TARIFA	TOTAL	TOTAL
PUNTA	2,88	66,00	194,80	194,60
VALLE	-	66,00	-	
NOCHE	-	39,00	-	

MARCA DENTRO DEL PERIODO DE DEDUCIBLE	
PUNTA :	NO
VALLE:	NO

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN EL PERIODO DE COBERTURA:				
PERIODO	kWh	TARIFA	TOTAL	TOTAL
PUNTA	-	66,00	-	-
VALLE	-	66,00	-	
NOCHE	-	39,00	-	

POTENCIA NO APORTADA POR AVERÍA		
PERIODO	POTENCIA	COSTO TOTAL
PUNTA :	- kW	-
VALLE:	- kW	-
PUNTA	VALOR APLICABLE	¢ -
VALLE	VALOR APLICABLE	¢ -

PÉRDIDAS DE RED	
	2,00%
Nota:	Las pérdidas de red ya se encuentran aplicadas en el cálculo de energía.

Dirección de Energía  
Departamento De Generación  
Parque Eólico Los Santos  
Línea de Producción

FECHA DEL REPORTE 4/11/2017

Generar Reporte



REPORTE DE ENERGÍA Y POTENCIA NO GENERADA POR AVERÍAS O DETENCIÓN DE AEROGENERADORES

MÁQUINA DETENIDA : AEG6

DATOS REFERIDOS DE LA MÁQUINA : AEG6

FALLA O MOTIVO DE DETENCIÓN :

Energía No Generada por instalación de bases para sensores.

PERIODO DE DETENCIÓN :	1/11/2017 10:30 AL	1/11/2017 14:00	Horas Equivalentes
PERIODO DEDUCIBLE:	1/11/2017 10:30 AL	2/11/2017 10:30	3,5
PERIODO DE COBERTURA	2/11/2017 10:30 AL	3/11/2017 14:00	

DATOS ENERGÉTICOS:	
ENERGÍA TOTAL EN EL PERIODO DE DETENCIÓN (kWh):	287,00
ENERGÍA TOTAL EN EL PERIODO DEL DEDUCIBLE (kWh):	-
ENERGÍA TOTAL EN EL PERIODO DE COBERTURA (kWh):	-

DATOS DE POTENCIA	
FECHA Y HORA DE LA MÁXIMA POTENCIA DE LA COOPERATIVA	
PUNTA:	
VALLE:	

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN EL PERIODO DE DETENCIÓN:				
PERIODO	kWh	TARIFA	TOTAL	TOTAL
PUNTA	175,07	₡ 88,00	₡ 11.804,83	
VALLE	81,84	₡ 55,00	₡ 6.068,51	₡ 16.961,03
NOCHE	-	₡ 38,00	₡ -	

MARCA DENTRO DEL PERIODO DE AVERÍA	
PUNTA:	NO
VALLE:	NO

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN EL PERIODO DEL DEDUCIBLE:				
PERIODO	kWh	TARIFA	TOTAL	TOTAL
PUNTA	-	₡ 88,00	₡ -	
VALLE	-	₡ 55,00	₡ -	₡ -
NOCHE	-	₡ 38,00	₡ -	

MARCA DENTRO DEL PERIODO DE DEDUCIBLE	
PUNTA:	NO
VALLE:	NO

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN EL PERIODO DE COBERTURA:				
PERIODO	kWh	TARIFA	TOTAL	TOTAL
PUNTA	-	₡ 88,00	₡ -	
VALLE	-	₡ 55,00	₡ -	₡ -
NOCHE	-	₡ 38,00	₡ -	

POTENCIA NO APORTADA POR AVERÍA		
PERIODO	POTENCIA	COSTO TOTAL
PUNTA:	- kW	₡ -
VALLE:	- kW	₡ -
PUNTA	VALOR APLICABLE	₡ -
VALLE	VALOR APLICABLE	₡ -

PÉRDIDAS DE RED		2,00%
Nota:	Las pérdidas de red ya se encuentran aplicadas en el cálculo de energía.	

TOTAL DE RECURSOS NO GENERADOS POR AVERÍA O SUSPENSIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR- RESUMEN		
RECURSOS NO GENERADOS EN TODO EL PERIODO DE LA AVERÍA O SUSPENSIÓN :	₡	18.961,03
RECURSOS NO GENERADOS EN EL PERIODO DE COBERTURA :	₡	-

6.5 Lista de comprobación visual de equipo de monitoreo de vibraciones.

TABLA DE CHEQUEO VISUAL DEL ESTADO DEL EQUIPO DE MONITOREO DE VIBRACIONES

Empresa que suministra en equipo: **Genbus General Business**  
 Empresa que realiza la compra: **COOPESANTOS, R.L**  
 Fecha: 29/08/2017  
 Orden de compra: OC PPRV-3132

ITEM	CANTIDAD SOLICITADA	DESCRIPCION	CANTIDA RESIVIDA	ESTADO
1	8	Conector hembra, recto, M12, 5polos, 5-hilos, AC/DC, Tensión de alimentación: 30 V AC / 36 V DC, Para sensores con Conector M12, 15 m, cable PUR, 5 x 0,25 mm <sup>2</sup>	8	Bueno
2	2	Electrónica de diagnóstico para detectores de vibraciones, Carcasa de plástico, Tensión de alimentación: 24 V DC ± 20 %, Consumo: 200 mA	2	Bueno
3	2	Cable de Programación recto / recto, RJ45, 8polos, 8- hilos, Cable de interconexión, conector RJ45 / conector RJ45, 2 m, cable PVC, Ethernet, Cable cruzado de interconexión	2	Bueno
4	8	Acelerómetro, Rango de medición: ± 25 g, Tensión de alimentación: 7,2...10,8 V DC, Consumo: 15 mA, Conexión por conector, Conector M12, para la conexión a electrónicas de diagnóstico externas tipo VSE	8	Bueno
5	1	Software de Parametrización para VSExxx and VNBxxx	1	Bueno

Descripción del estado:

- Bueno El equipo no presenta daños visibles en la superficies.
- Regular El equipo presenta decoloraciones, ralladuras, o alteraciones en la superficie.
- Malo El equipo presenta desprendimiento se alguna seccion o daños graves en la superficie.

  
 Kenneth Gutiérrez R.  
 Practicante encargado de la implementación del

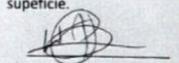
  
 Braulio Moya  
 Asistente de ingeniería.  
 Dep. de Generación de energía.

Figura 6.1 Lista de Chequeo del equipo de monitoreo.

Fuente: Fotografía propia.

## 6.6 Pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo y software de monitoreo

Es importante antes de realizar la prueba del equipo en banco antes de realizar la instalación del equipo en el aerogenerador, para realizar dichas puestas en marcha, realizo una reunión con el Ingeniero Arturo Moya asesor técnico de Gembus, para realizar unas pruebas del equipo con la asesoría técnica del experto para este tipo de equipos.

Además, aprovechando la presencia del experto se coordina la capacitación para el Ingeniero de Mantenimiento Ólger Robles y el asistente de Ingeniería Braulio Moya, con el fin de realizar la presentación de software y que conozcan los alcances e inquietudes con respecto a la utilidad y utilización de los mismos.

Para realizar las pruebas se debe realizar la configuración de las electrónicas para comprobar las tomas de lecturas, a continuación se presentan Captura de Pantallas de la interface con la cual el usuario se enfrentará al utilizar el equipo.

Lo primero es realizar las concesiones del hardware que se presenta en la sección 4.1 donde se establece los diagramas de instalación de los diferentes elementos del kit.

Después de realizar las conexiones se procede a ejecutar el software de monitoreo, un dato importante a resaltar es que el mismo es un ejecutable por lo cual no se debe de realizar la instalación en una computadora, con lo cual se logra diferentes accesos para las personas responsables del seguimiento del equipo.

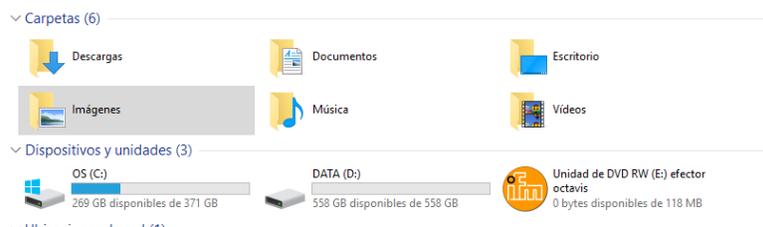


Figura 6.2 Representación del icono de acceso del software efector octavis.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

La primera ventana se enfrenta cuanta con todo las opciones de una interface para sistema operativo Windows con los iconos de guardar, general nuevos proyecto, abrir proyectos, por citar algunas de sus opciones.

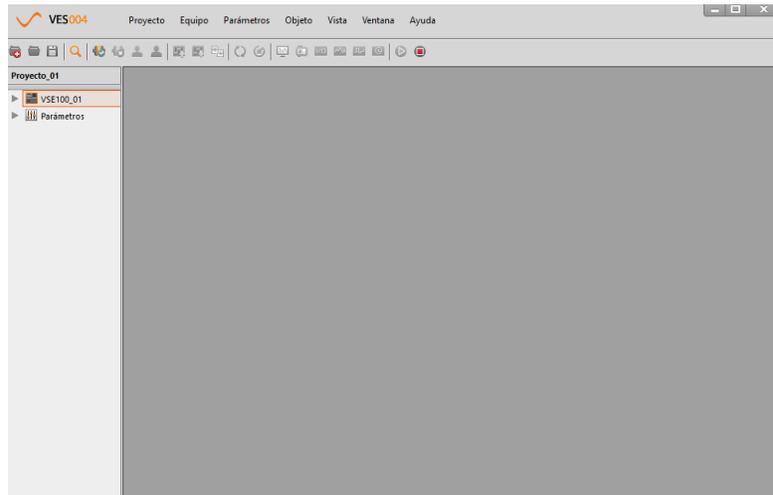


Figura 6.3 Captura de Pantalla de la presentación de la interface introductoria del software efector octavis.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Al iniciar la un nuevo proyecto se debe de seleccionar el modelo de electrónica de monitoreo que se empleará, ya que el software puede utilizarse para diferentes electrónicas que se puedan implementar con este kit. Para lo cual se desplaza a la opción de equipo y se selecciona la VSE 100.

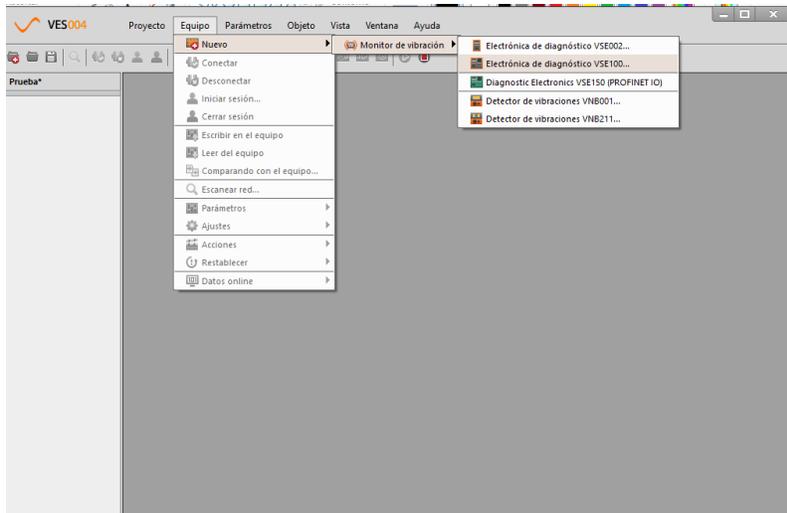


Figura 6.4 Selección de las electrónicas de monitoreo para la puesta en marcha.  
**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Con lo cual se desplegará la ventana en la que se le designa nombre al proyecto para la práctica se designa como prueba del equipo.

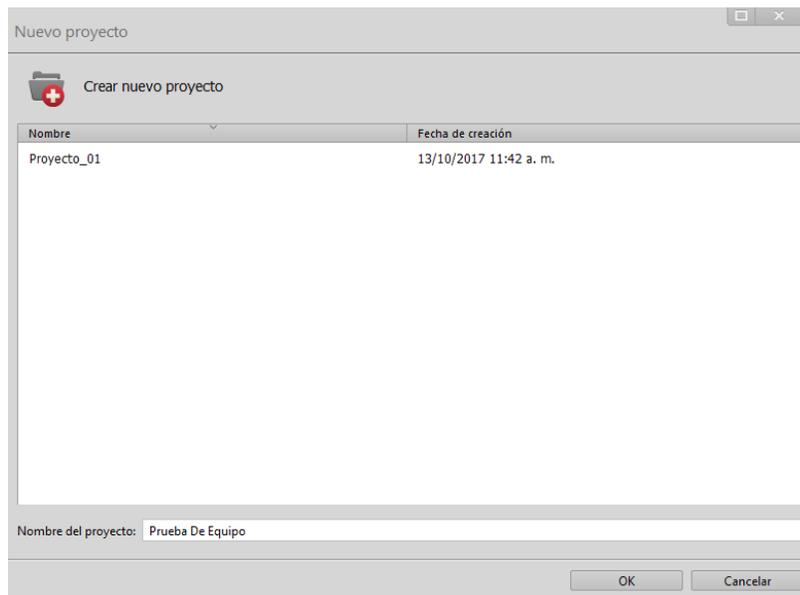


Figura 6.5 Nombramiento del proyecto.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Una vez designado en el nombre del proyecto se habilita la ventana para realizar las configuraciones del proyecto, además permite ver las características de hardware de las electrónicas que se configurará.

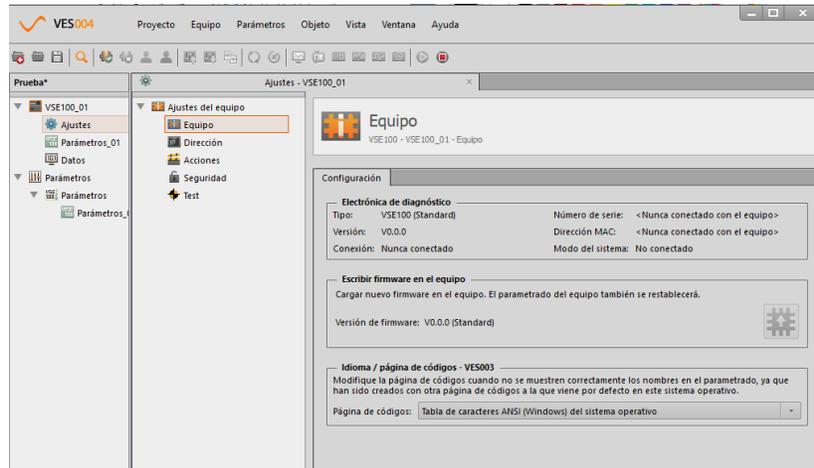


Figura 6.6 Características del equipo e indicó de configuración del proyecto.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Seguidamente, nos desplazamos a la casilla de dirección, la cual es uno de los aspecto cruciales al instalar este equipo, debido a que es un monitoreo remoto por lo que se debe de configurar las direccione IP (Protocolo de Internet) de la electrónicas de diagnóstico, los configuración de fábrica, la electrónicas están establecidas en el puerto 3321.

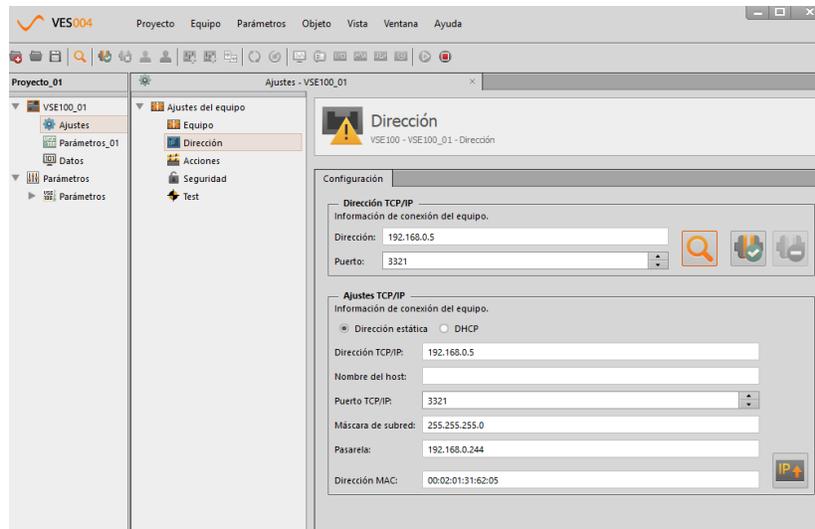


Figura 6.7 Configuración de la dirección IP de la electrónica de monitoreo.  
**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Para la detección de las electrónicas se puede apoyar en el icono de buscar, que se presenta como un lupa con la cual el mismo software realiza la búsqueda de las electrónicas que se encuentran disponibles en la red de monitoreo.

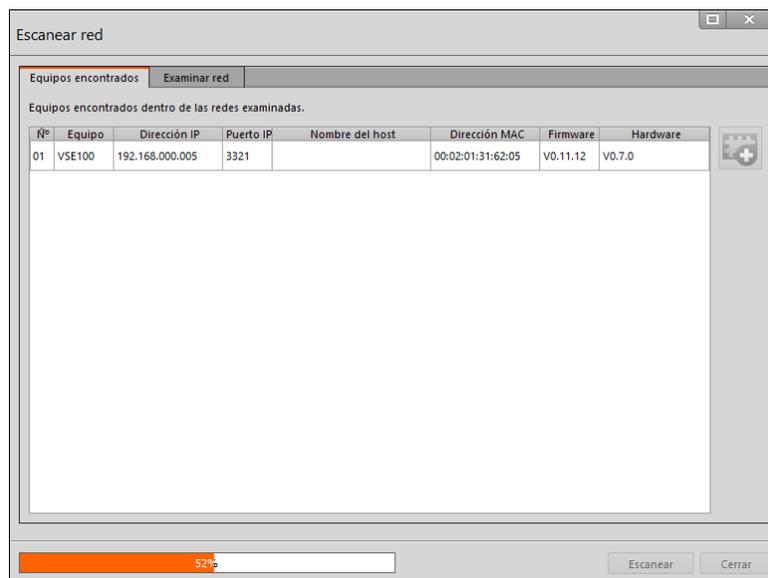


Figura 6.8 Selección de la dirección IP del equipo donde se realizará el análisis.  
**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

En la el icono de acciones nos permite re-establecer parámetros de fábrica en la electrónicas, lo que permite reiniciar los parámetro para poder programar nuevas tareas de monitoreo en los mismos equipos o reiniciar la toma de datos de un proyecto ya programado.

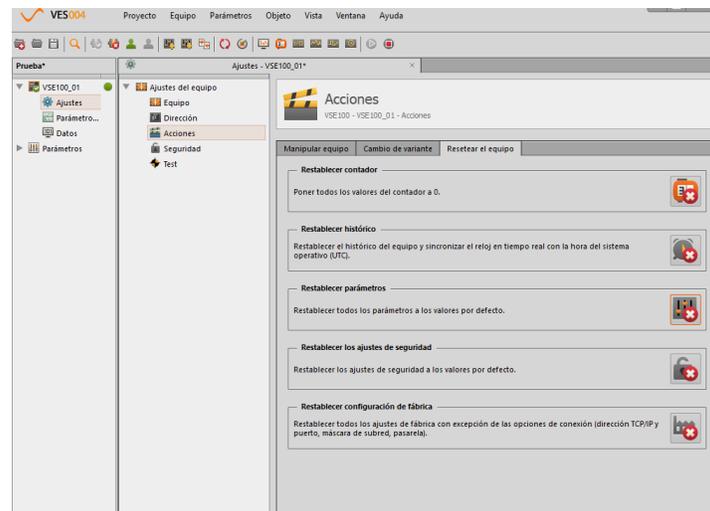


Figura 6.9 Ventana de acciones del equipos de monitoreo.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

En el apartado de seguridad el software nos permite realizar deferentes accesos de seguridad, los cuales son utilices para permitir controlar las personas que entren en contacto con los datos que se están recopilando en los estudios que se están realizando.

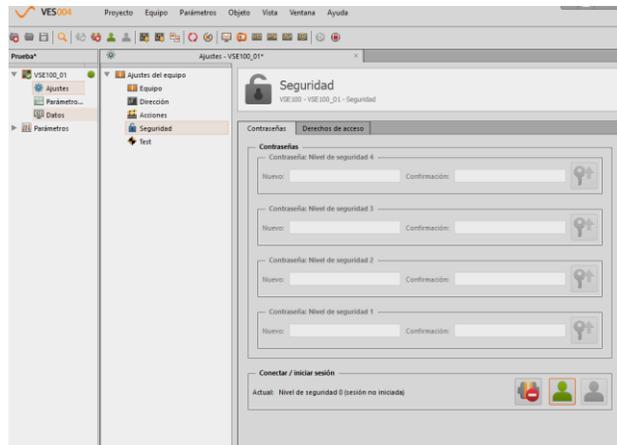


Figura 6.10 Creación de niveles de seguridad para los diferentes usuarios.  
**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Dentro de los niveles de acceso se puede determinar las acciones que cada usuario puede realizar, el software permite activar o desactivar estas actividades mediante una lista de chequeo que viene pre-programada como se muestra en la siguiente Captura de Pantalla.

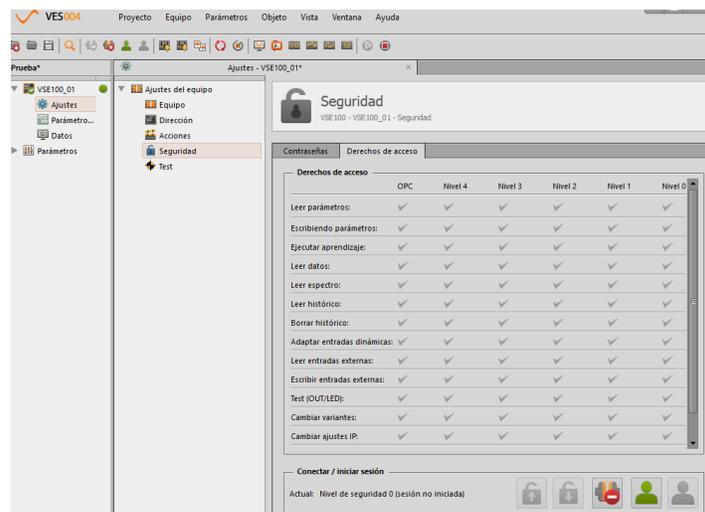


Figura 6.11 Generación de niveles de permiso para el diferente usuario creados.  
**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).

Una vez corroborada las direcciones IP y niveles de seguridad, se realiza un test de comunicación entre la computadora y las electrónicas de monitoreo, con lo cual se realiza el encendido de los led de forma manual activando y observando su respuesta en el hardware de la misma.

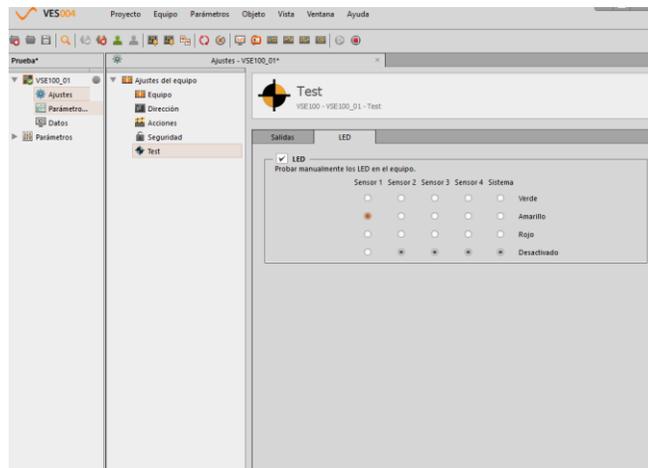


Figura 6.12 Ventana de comprobación para la comunicación entre la computadora y las electrónicas de monitoreo.

**Fuente:** Captura de Pantalla (Parameter setting software for efector octavis, 2015).



Figura 6.13 Reacción de la electrónica de monitoreo para corroboración de comunicación.

**Fuente:** Fotografía Propia.

Una vez terminado el testeo de la comunicación se procede a parametrización de los elementos, los cuales son la base para la determinación de los resultados del análisis que se desea llevar a cabo.

En primer punto corresponde a la activación de los Acelerómetros dependiendo de la cantidad que se vayan a utilizar y el tipo de entrada sea analógica o digital.

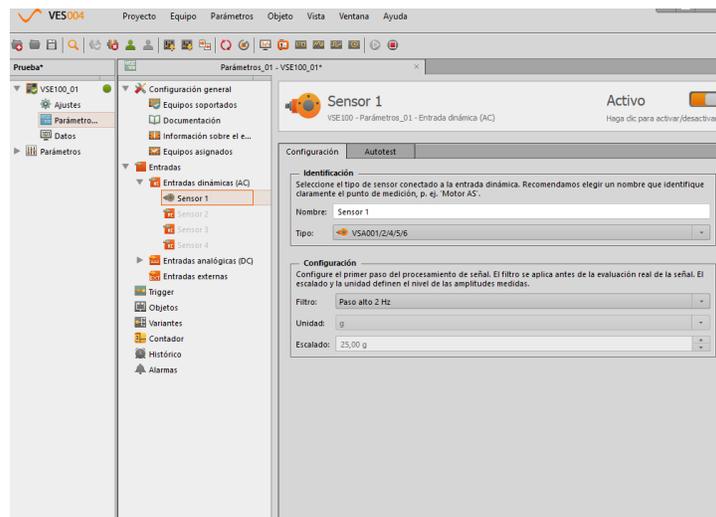


Figura 6.14 Habilitación de entradas digitales para la toma de mediciones.

**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

Además, se debe de seleccionar el tipo de sensor que se va a instalar, debido a que con este tipo de kit se pueden utilizar una amplia gama de Acelerómetros, en nuestro caso los que adquirieron el VSA001.

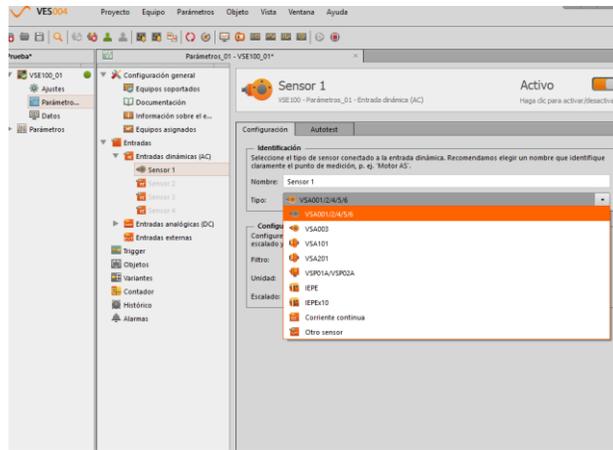


Figura 6.15 Selección de tipo de Acelerómetros que se emplearán.  
**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

El software para realizar un estudio de monitorio lo define como objetos, que comprende los rangos, tipos de medición, etc.

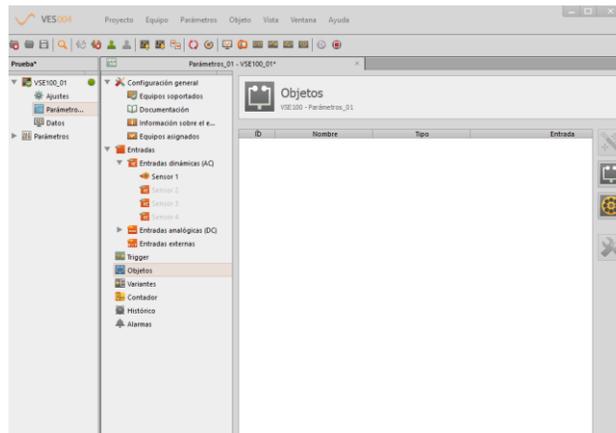


Figura 6.16 Establecimiento de objetos.  
**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

En la configuración de los objetos el primer parámetro a configurar es el tipo de medición que se realizará, para nuestro caso se realizará la medición de la aceleración, una función de la frecuencia, ya que queremos realizar un análisis.

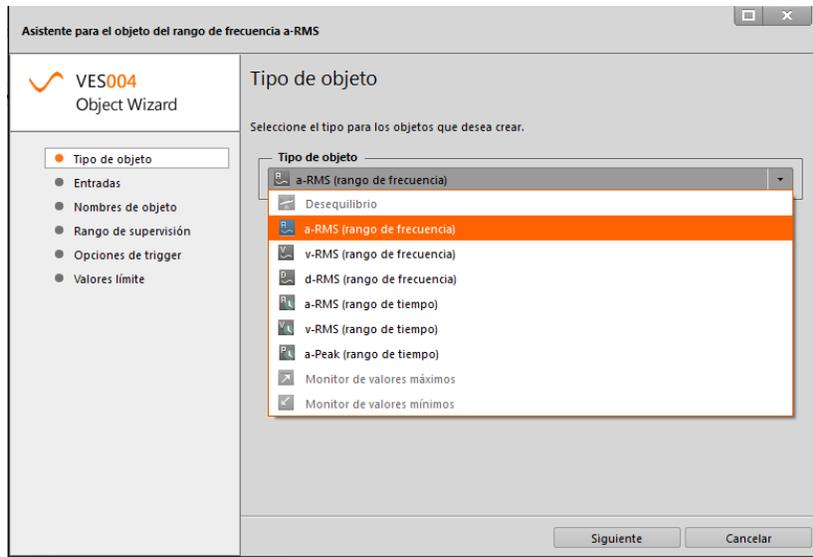


Figura 6.17 Selección del tipo de objeto que se desea implementar.

**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

Seguidamente, se selecciona los Acelerómetros que se desean emplear en cada uno de los análisis, dependiendo del tipo de análisis que se desea llevar a cabo y la posición en la cual se instalaron.

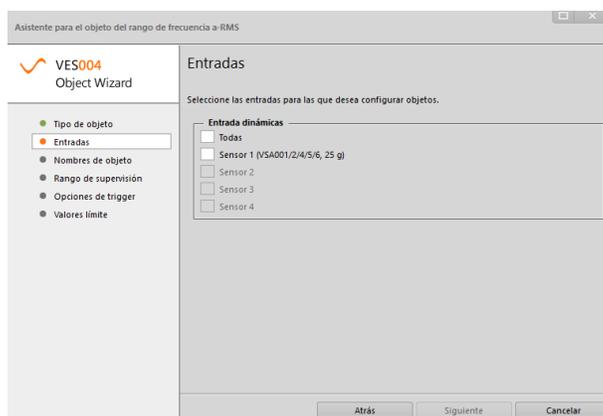


Figura 6.18 Selección de los Acelerómetros que se desean implementar en el objeto.

**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

Se debe de seleccionar un nombre para el objeto para nuestro caso XXX-05, donde primero va colocado el nombre del elemento como por ejemplo, collarín, seguido del aerogenerador donde se instalará, como se establece en la tabla 7.

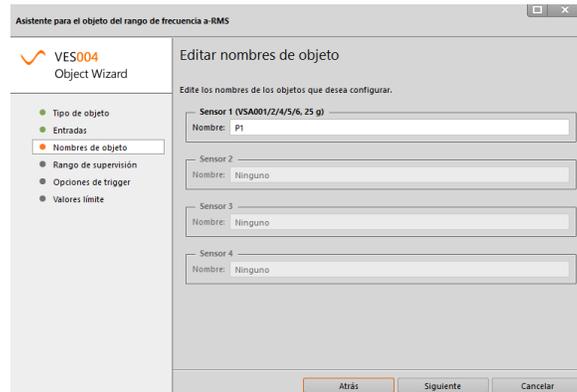


Figura 6.19 Designación del nombre del objeto.

**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

El rango de medición es establecido con base en lo que designa la norma ISO 10816-21, para este tipo de elementos se consideran rangos de 10 Hz a 1000 Hz.

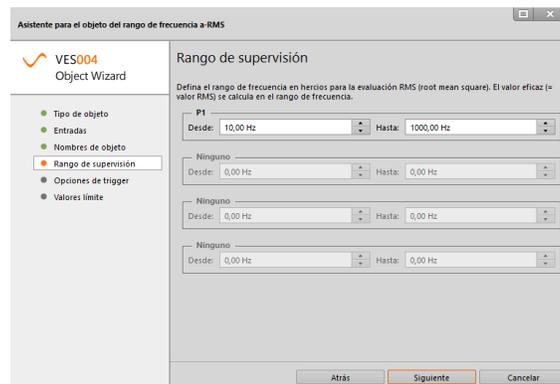


Figura 6.20 Selección de los rangos de medición de los objetos.

**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

La opción de disparadores se utiliza para el control, es decir, iniciar y detener los cálculos de objetos y contadores.

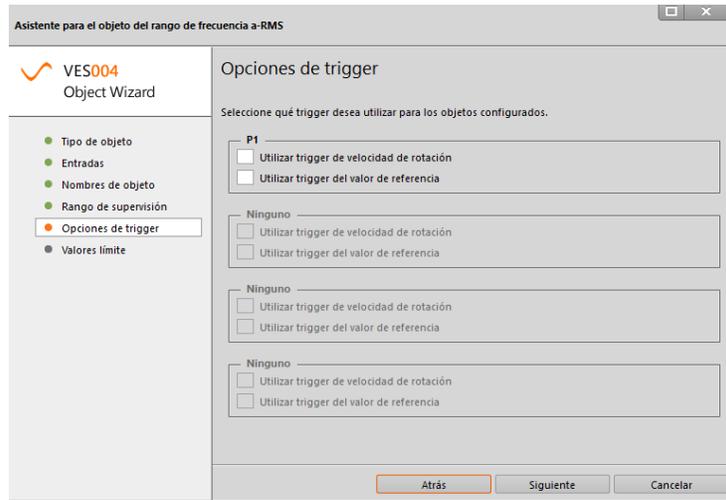


Figura 6.21 Definición del Trigger.

Fuente: (efector octavis VSE004, 2017).

Los valores límites son lo que dispararán las alarmas que se emplearán como indicadores que el equipo se salió de su estado normal de operación.

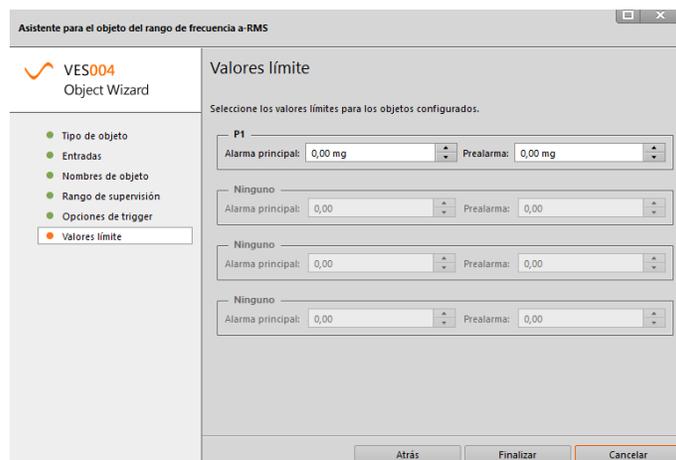


Figura 6.22 Definición de las alarmas para las mediciones.

Fuente: (efector octavis VSE004, 2017).

Una vez finalizado la configuración del objeto se presentarán en una ventana la cantidad de objetos que se deba de llevar a cabo.

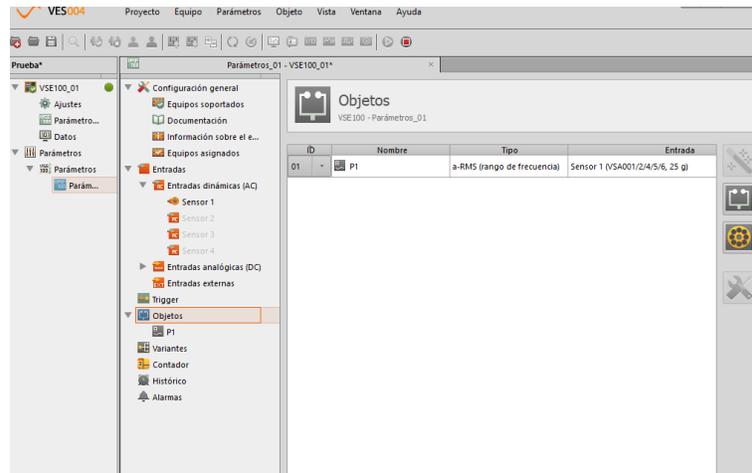


Figura 6.23 Presentación del objeto configurado.

**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

Una vez iniciado el estudio del software VSE044, este nos suministra una serie de representación de los datos, entre los cuales se encuentran:

El espectro que es una de las representaciones fundamentales al momento de realizar un análisis de condición mediante la implantación de un análisis de vibraciones.

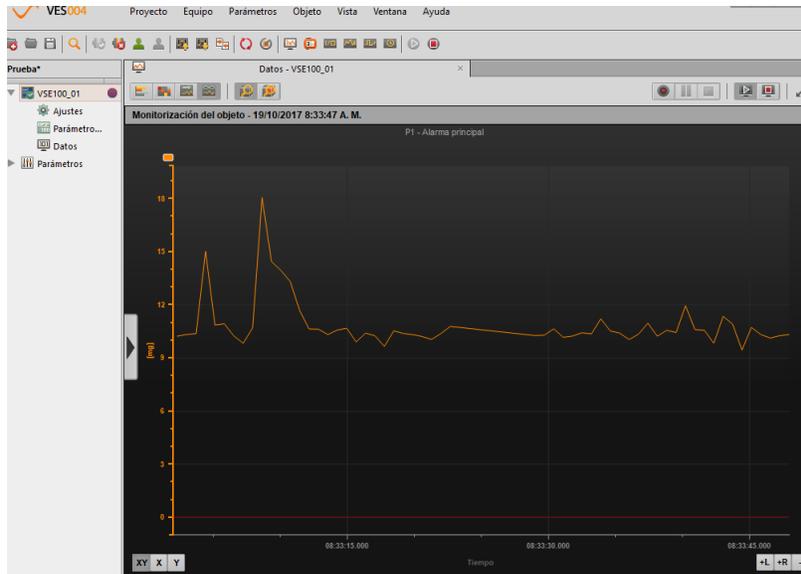


Figura 6.24 Presentación del espectro de la toma de datos.

**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

Además, nos presenta todos los datos en forma de gráfica, con la cual se pueden establecer tendencia de comportamiento, además de la extracción de los datos para la administración y análisis del mismo.

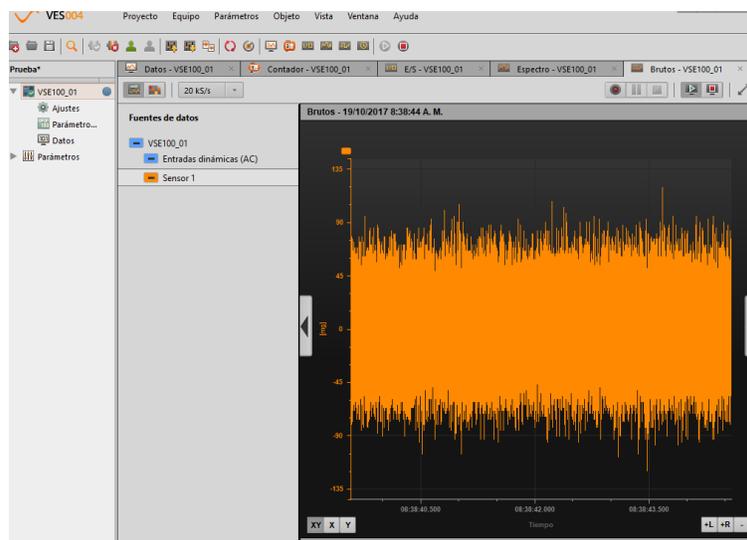


Figura 6.25 Representación gráfica de los datos brutos de la medición.

**Fuente:** (efector octavis VSE004, 2017).

También suministra una representación de los históricos del equipo, con lo cual podemos analizar el comportamiento del equipo a lo largo del tiempo.

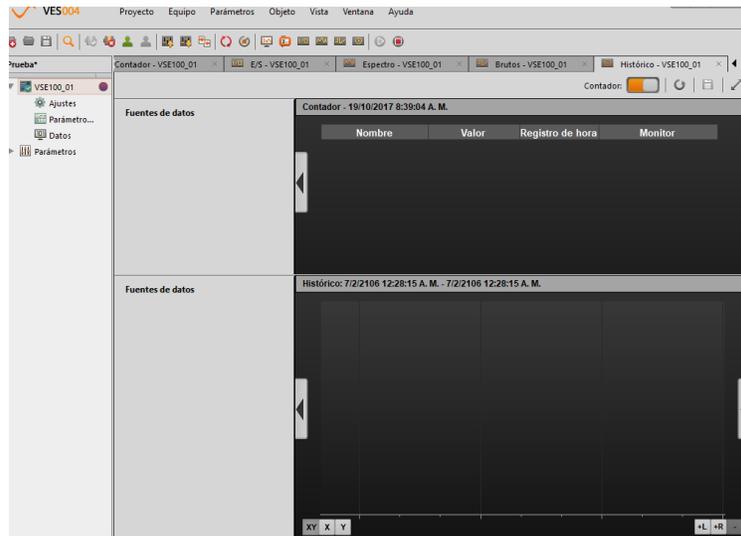


Figura 6.26 Presentación de la historia de los datos.

Fuente: (efector octavis VSE004, 2017).

## 6.7 Pruebas con adhesivo AA 312 y activador SF 376 loctite.

Para la elección de ese adhesivo se logró obtener una reunión con el asesor técnico de Henkel en Costa Rica el Ingeniero Álvaro Piedra, con el cual se estableció una reunión con el fin de que realizara una presentación del adhesivo AA 312 y su activador SF 376.

Para dicha presentación se preparó una demostración de la forma adecuada de la utilización, para lo cual se prepararon dos láminas de metal una de un acero 1020 para simular la superficie las máquinas a las cuales se los va a colocar el adhesivo y una lámina de acero inoxidable para representar las bases de acero inoxidable que se utilizarán.



*Figura 6.27 Láminas de pruebas para el adhesivo AA312 y activador SF 376 loctite.*

**Fuente:** Fotografía propia.

Para la limpieza de la superficie se realizan con el limpiador SF 7039, ya que por sus características permite obtener la superficie limpia de impurezas, como aceite o agua que no permitan la adecuada adhesión de los sustratos, al momento de aplicar el producto se debe de remover con toallas, de manera que no quede pelusas u otro tipo de suciedad adicional.

Al adhesivo AA 312 se aplica en el acero 1020, se debe de colocar de manera que al realizar la unión de los dos elementos se distribuya uniformemente la cantidad del producto que se aplicó, la forma de aplicarlo es en zic-zac como se representa en la figura que se presenta a continuación.



Figura 6.28 Distribución del adhesivo en la lámina de acero 1020.

**Fuente:** Fotografía propia.

El activador se coloca sobre el acero inoxidable, dado que este activador tiene presentación en spray se pueda aplicar abundantemente, ya que se evapora con bastante rapidez.

Una vez aplicado los productos a ambas superficies se procede a realizar la unión, se debe de tratar durante los primeros minutos que se mantengan inmóviles para que el adhesivo se enderezca.



Figura 6.29 Láminas unidas mediante adhesivo AA 312 loctite.

**Fuente:** Fotografía propia.

## 6.8 Lista de check de corroboración de materiales.

En la siguiente liste de check se presentarán los materiales necesarios para instalación e implementación de lo acelerómetro.

Tabla 6.1 Lista de materiales.

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Check</b>
Adhesivo AA 312 loctite 50 ml.	1	<input type="checkbox"/>
Activador SF 736 loctite 6 OZ.	1	<input type="checkbox"/>
Limpiador Flamable loctite 7039.	1	<input type="checkbox"/>
Base de acero inoxidable para acelerómetro.	8	<input type="checkbox"/>
Electrónica de diagnóstico.	2	<input type="checkbox"/>
Conector hembra.	8	<input type="checkbox"/>
Cable de Programación recto.	2	<input type="checkbox"/>
Acelerómetro.	8	<input type="checkbox"/>
Extensión eléctrica.	1	<input type="checkbox"/>
Cortadora de cable.	1	<input type="checkbox"/>
Peladora de cable.	1	<input type="checkbox"/>
Masquen.	1	<input type="checkbox"/>
Lapicero.	1	<input type="checkbox"/>
Computadora.	1	<input type="checkbox"/>
Toallas desechables.	1	<input type="checkbox"/>

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

## 6.9 Cálculo de costo de mano de obra para la instalación.

La instalación se ejecutó mediante dos tractos debido a que el proceso de adhesión necesita un tiempo de curación de 24h, se utilizaron las siguientes tablas:

El primero segmento comprende la instalación de las bases y cableado.

Tabla 6.2 Lista de control de tiempo y cantidad de personal para la instalación de las bases y cableado

Actividad	Cantidad de técnicos	Tiempo en min
Retiro de los materiales correspondientes en el edificio de mantenimiento, para el respectivo proceso de instalación descritos en la hoja de materiales y equipos.	_____	_____
Desplazamientos del equipo de mantenimiento al aerogenerador que comprende la distancia de 2 km.	_____	_____
Realizar el protocolo de ingreso, colocando el aerogenerador se encuentre fuera de servicio y colocándose el respectivo equipo de seguridad para realizar el ingreso.	_____	_____
Reconocimiento visual sobre el lugar en el cual se colocan los sensores según lo establecido en el documento teórico.	_____	_____
Preparación de donde se instalará en el sensor con el mototool, de manera que la superficie quede libre para la aplicación del adhesivo.	_____	_____
Adhesión de las bases para los acelerómetros en sus respectivas localidades.	_____	_____
Realizar el tendido del cableado y rotulación debida para la posteríos conexión.	_____	_____
Retiro del aerogenerador para permitir la curación del adhesivo.	_____	_____

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

El segundo tracto comprende la instalación y pruebas de comunicación de los acelerómetros con las electrónicas.

Tabla 6.3 Lista de control de tiempo y cantidad de personal para la instalación del acelerómetro y pruebas de comunicación

<b>Actividades</b>	<b>Cantidad de técnicos</b>	<b>Tiempo en min</b>
Ejecutar el protocolo de ingreso, colocando el aerogenerador se encuentre fuera de servicio y colocándose el respectivo equipo de seguridad para realizar el ingreso.	_____	_____
Realizar la conexión del cableado con base en el diagrama que se presenta en el documento teoría.	_____	_____
Ejecutar la verificación del proceso de adhesión de las bases en el aerogenerador.	_____	_____
Efectuar la instalación de los acelerómetros en las respectivas bases.	_____	_____
Realizar las respectivas pruebas de comunicación mediante la utilización del software de parametrización.	_____	_____
Retiro del aerogenerador.	_____	_____

**Fuente:** Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016).

## CAPÍTULO 7: Bibliografía.

---

- ABB. (2011) *Technical application papers no.13: Wind power plants*. Bérghamo, Italia.
- Acuña, J. (2003). *Ingeniería de confiabilidad (Primera ed.)*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- BEYONDTECH. (22 de Octubre de 2018). Obtenido de BEYONDTECH: <https://beyondtech.us/blogs/beyond-blog/81776961-optical-fiber-applications-in-cctv-systems>
- Brandão, R., Carvalho, J., & Barbosa, F. (2010). *Neural networks for condition monitoring of wind turbines. Paper presented at the Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium, 1-4.*
- Bogantes, B. (2016). *Desarrollo De La Estructura Necesaria Para La Implementación De Un Modelo De Toma De Decisiones Para Mantenimiento Basado En El Deterioro Multiestado Para El Parque Eólico Los Santos*. Cartago.
- CoopeSantos. (23 de Abril de 2017). Obtenido de CoopeSantos: <http://www.coopesantos.com/contenido/pagina/%C2%BFqui%C3%A9nes-somos-2.html>
- cybertesis. (23 de Junio de 2017). Obtenido de cybertesis: [http://cybertesis.ubiobio.cl/tesis/2004/masias\\_i/html/TH.3.html](http://cybertesis.ubiobio.cl/tesis/2004/masias_i/html/TH.3.html)
- Gamesa. (2007). *Gamesa g52-850 kW*. Extraído de [www.wind-power-program.com/Library/Turbine%20leaflets/Gamesa/Gamesa%20G52%20850kw.pdf](http://www.wind-power-program.com/Library/Turbine%20leaflets/Gamesa/Gamesa%20G52%20850kw.pdf)
- Gershenson, C. *Artificial networks for beginners*. Extraído de [arxiv.org/ftp/cs/papers/0308/0308031.pdf](http://arxiv.org/ftp/cs/papers/0308/0308031.pdf)
- ifm. (02 de Agosto de 2017). Obtenido de if: <https://www.ifm.com/img/rtm-story-10-09.pdf>
- ifm. (03 de Agosto de 2017). Obtenido de ifm: <https://www.ifm.com/mounting/80227555ES.pdf>
- ifm. (05 de Agosto de 2017). Obtenido de ifm: <https://www.ifm.com/products/nz/ds/VSE100.htm>

*ifm.* (05 de Agosto de 2017). Obtenido de *ifm*:  
<https://www.ifm.com/es/es/product/VES003>

*Industrial & Enterprise lot Solution.* (20 de Octubre de 2017). Obtenido de *Industrial & Enterprise lot Solution*:  
<http://www.industrialnetworking.com/Category/8-Port-Fast-Ethernet-Unmanaged-Switches/Moxa-EDS-308-Series-Unmanaged-Ethernet-Switches>

*inessman.* (23 de Abril de 2017). Obtenido de *inessman*:  
[http://www.inessman.com/productos\\_metravib.php](http://www.inessman.com/productos_metravib.php)

*Inventor.* (2017). Autodesk.

*Jardine, A. & Tsang, A. (2013). Maintenance, replacement and reliability: Theory and applications (Segunda Ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.*

*Kuo, W. & Zuo, M. (2003). Optimal reliability modeling: Principles and applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.*

*LOCTITE.* (25 de Octubre de 2017). Obtenido de *LOCTITE*: <http://www.henkel-adhesives.es/homepage.htm>

*LOCTITE.* (11 de Octubre de 2017). Obtenido de *LOCTITE*:  
<http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/AA%20330-ES?pid=AA%20330&format=MTR&subformat=REAC&language=ES&plant=WERCS>

*LOCTITE.* (11 de Octubre de 2017). Obtenido de *LOCTITE*: <http://na.henkel-adhesives.com/product-search-1554.htm?nodeid=8797889921025>

*Loria, A. (2016). Diseño de un modelo de toma de decisiones para mantenimiento basado en el monitoreo del deterioro multi-estado para un sistema de aerogeneración instalado en Costa Rica.*

*Marsland, S. (2017) Machine learning: An algorithmic perspective (Segunda ed.). Palmerstan North, New Zealand: CRC Press. Masoum, M. A. S., & Fuchs, E. F. (2015). Power quality in power systems and electrical machines (Segunda ed.) Elsevier. Extraído de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPQPSEME7/power-quality-in-power/powerquality-in-power>*

*Parameter setting software for efector octavis. (2015). ifm electronic.*

*Pistarelli, A. (2010). Manual de mantenimiento: Ingeniería, Gestión y Organización. Buenos Aires, Argentina. Editorial Talleres gráficos RyC.*

*Preditécnico. (24 de Junio de 2017). Obtenido de Preditécnico:  
<http://www.preditecnico.com/2012/12/tesis-doctoral-modelo-para-la.html>*

*PRODUCTS FOR AUTOMATION. (20 de Octubre de 2018). Obtenido de  
PRODUCTS FOR AUTOMATION:  
<https://www.productsforautomation.com/ntron-st-ethernet-switch-15km-306fxe2nst15-p/306fxe2-n-st-15.htm>*

*Ribrant, J. & Bertling, L. (2007). Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997–2005. IEEE Transactions on Energy Conversion, 22(1), 167-173. doi:10.1109/TEC.2006.889614*

*Ribrant, J. (2006, Reliability performance and maintenance: A survey of failures in wind power systems. KTH school of electrical engineering.*

*Ríos Ledezma, M. (2017). Diseño de una metodología basada en redes neuronales artificiales para la predicción de vida útil acumulada del sistema hidráulico de un aerogenerador g52/850 instalado en el Parque Eólico Los Santos (Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.*

*Ruiz, S. (2017). La predicción del dato: Redes neuronales artificiales. Extraído de <http://www.analiticaweb.es/la-prediccion-del-dato-redes-neuronales-artificiales/>*

*Sheng, S. & Veers, P. (2011). Wind turbine drivetrain condition monitoring- an overview. Unpublished manuscript.*

*Spares in Motion logo. (25 de Septiembre de 2017). Obtenido de Spares in Motion logo: <https://www.sparesinmotion.com/es/repuestos/multiplicadoras/bosch-rexroth-r916637481>*