



Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electromecánica



COOPESANTOS R.L.

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.

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

Mauren Ríos Ledezma

Cartago

Junio, 2017

Profesor Guía

Ing. Carlos Piedra Santamaría

Asesor Industrial

Ing. Jeffrey Luna Galera

Tribunal Examinador

Gilbert Bonilla

Julio Mora

Información del estudiante y de la empresa

Nombre: Mauren Ríos Ledezma
Cédula: 504030777
Carné TEC: 201251204
Dirección de residencia en época lectiva: Residencias Estudiantiles del Tecnológico de Costa Rica.
Dirección de residencia en época no lectiva: 150 m sur de La Escuela El Guapinol, La Cruz, Guanacaste.
Teléfono en época lectiva: 84227859
Teléfono en época no lectiva: 84227859
Email: Mau.rios.le94@gmail.com
Fax: N/A

Información del Proyecto

Nombre del Proyecto: 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.

Profesor Asesor: Ing. Carlos Piedra Santamaría
Asesor Industrial: Ing. Jeffrey Luna Galera
Horario de trabajo del estudiante: Lunes a Viernes de 7:00 am a 5:00 pm

Información de la Empresa

Nombre: COOPESANTOS R.L.
Zona: San Marcos de Tarrazú, San José - Costa Rica.
Dirección: Contiguo al cementerio de San Cristóbal Sur.
Teléfono: (506) 25462525
Fax: (506) 25466173
Apartado: 003-8065 Tarrazú, San José, Costa Rica.
Actividad Principal: Generación y distribución de energía eléctrica

Dedicatoria

A mis padres, hermanos y hermanas, quienes a pesar de la distancia siempre han mostrado su cariño y apoyo, velando para que nada me faltara y así lograra cumplir mi sueño.

A Michael, por su amistad incondicional, y toda la ayuda y compañía brindada en estos años.

A José Pablo, por todo su amor, comprensión, motivación, y compañía brindada, y por estar siempre a mi lado en esta nueva etapa de mi vida.

Agradecimientos

A Dios, por permitirme llegar hasta donde estoy, y por darme la fortaleza para superar las dificultades.

A mis padres, Luisa Ledezma y Baltazar Ríos, por confiar en mí, brindarme su apoyo y siempre estar ahí cuando los necesito.

A mis hermanas, Marta, Iliana y María, por toda la ayuda y cariño brindado, y a mis sobrinos, quienes son mi inspiración para seguir adelante.

A mis hermanos Domingo, Valentín, Dimas, José y Néstor, quienes me han apoyado y me han brindado su ayuda.

A Michael, el mejor amigo que el TEC me pudo dar, por todo el apoyo y motivación brindada.

A José Pablo, por ser tan maravilloso, por creer en mí y animarme cuando más lo necesite.

A Xinia Martínez y a toda su familia, por todo el cariño brindado y hacerme sentir como de la familia.

A la Ing. Ana Laura Loria y al Ing. Bryan Bogantes, quienes iniciaron con este proyecto y tuvieron la confianza de dejarlo en mis manos para su continuación, gracias por todo su apoyo y orientación.

Al profesor Carlos Piedra, por toda su ayuda, motivación y apoyo durante el transcurso de mi carrera y durante la elaboración del proyecto.

Al Ing. Jeffrey Luna, por confiar en mí y brindarme esta oportunidad, al Ing. Ólger Robles por su ayuda y orientación, y a todos los compañeros de COOPESANTOS por recibirme como uno de ellos y por su disposición para colaborar en los que les fuera posible.

A mis compañeros y profesores del TEC, quienes contribuyeron a mi formación profesional.

Al Programa de Residencias Estudiantiles del TEC, y a todos los residentes, quienes formaron parte de mi vida durante estos últimos cinco años.

Tabla de Contenidos

Resumen.....	18
Abstract.....	19
Acrónimos	20
CAPÍTULO 1: Introducción.....	21
1.1 Reseña de la Empresa	21
1.2 Descripción del proceso	22
1.2.1 Proyecto Hidroeléctrico San Joaquín Los Santos	22
1.2.2 Parque Eólico Los Santos.....	23
1.3 Objetivos del Proyecto.....	24
1.3.1 Objetivo General	24
1.3.2 Objetivos Específicos.....	24
1.4 Descripción del Proyecto.....	25
1.5 Motivaciones.....	29
1.6 Metodología.....	34
1.7 Cronograma.....	36
1.8 Alcance del proyecto	37
1.9 Limitaciones del proyecto	37
CAPÍTULO 2: Marco Conceptual	38

2.1 Ingeniería de Confiabilidad	38
2.1.1 Costos de la confiabilidad	39
2.1.2 Necesidad del modelo de la confiabilidad	40
2.2 Probabilidad y Estadística en la Confiabilidad	40
2.2.1 Variables Aleatorias	41
2.2.2 Función de Distribución Acumulada.....	41
2.2.3 Función de Confiabilidad.....	42
2.2.4 Tasa de Riesgo	42
2.2.5 Distribución Weibull.....	43
2.2.6 Distribución Normal.....	45
2.3 Tipos de Mantenimiento	48
2.3.1 Mantenimiento Correctivo	48
2.3.2 Mantenimiento Preventivo.....	49
2.3.3 Mantenimiento Basado en la condición.....	50
2.4 Mantenimiento Selectivo.....	51
2.5 Redes Neuronales Artificiales.....	52
2.5.1 Función de Activación Sigmoidal	54
2.5.2 Función de red o propagación	55
2.5.3 Fase de Aprendizaje y Fase de Prueba	55

CAPÍTULO 3: Turbinas Eólicas.....	58
3.1 Sistemas principales de un Aerogenerador	59
3.1.1 Sistema de Captación	59
3.1.2 Sistema de Transmisión.....	60
3.1.3 Sistema de orientación.....	61
3.1.4 Sistema de Generación.....	62
3.1.5 Sistema de Control.....	63
3.1.6 Sistemas de Soporte.....	63
3.1.7 Sistema de Refrigeración.....	63
3.1.8 Sistema Hidráulico	64
3.2 Sistema hidráulico de los aerogeneradores.....	65
3.2.1 Grupo hidráulico Carga del acumulador.....	66
3.2.2 Circuito de Freno.....	67
3.2.3 Circuito de Freno de Yaw.....	68
3.2.4 Elementos Funcionales.....	68
3.2.5 Componentes del sistema hidráulico	70
3.3 Tendencia de Fallas de los componentes de un aerogenerador	73
3.3.1 Reino Unido	74
3.3.2 Suecia.....	74

3.3.3 Finlandia	75
3.3.4 Alemania	76
CAPÍTULO 4: Modelo a Implementar.....	78
4.1 Diseño de un modelo de toma de decisiones para mantenimiento basado en el monitoreo del deterioro multiestado para un sistema de aerogeneración instalado en Costa Rica	78
4.1.1 Datos Iniciales.....	79
4.1.2 Construcción de las Redes Neuronales Artificiales.....	80
4.2 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	83
4.2.1 Componentes Críticos.....	83
4.2.2 Variables de Condición y Redes Neuronales Propuestas para cada Sistema	94
CAPÍTULO 5: Panorama de Implementación	98
5.1 Parque Eólico Los Santos	98
5.2 Panorama Actual	100
5.2.1 Softwares Utilizados.....	101
5.3 Estado Actual de los Componentes del Sistema Hidráulico	109
5.3.1 Grupo Hidráulico	110
5.3.2 Sistema de Freno.....	111

5.3.3 Sistema de Pitch	112
5.3.4 Sistema de Yaw	114
5.3.5 Situación Actual de Mantenimiento	116
5.3.6 Historiales de Mantenimiento.....	116
5.3.7 Costos Asociados a los Aerogeneradores	118
5.3.1 Índices de Mantenimiento	123
CAPÍTULO 6: Red Neuronal Artificial del Sistema Hidráulico	125
6.1 Aerogenerador más Representativo del PELS	126
6.2 Variables de Condición a Monitorear del Sistema Hidráulico	126
6.2.1 Presión Freno Yaw.....	127
6.2.2 Presión Grupo Hidráulico	129
6.2.3 Temperatura de aceite Grupo Hidráulico	130
6.2.4 Angulo de Pitch.....	130
6.2.5 Variables de Condición seleccionadas.....	131
6.3 Topología de la red Neuronal Para el Sistema Hidráulico	132
6.3.1 Entradas de la Red Neuronal Artificial del Sistema Hidráulico	132
6.3.2 Salida de la Red Neuronal Artificial del Sistema Hidráulico	133
6.4 Programación de la Red Neuronal del Sistema Hidráulico	135
6.4.1 Programación Algoritmo Red Neuronal Artificial	135

6.4.2 Backpropagation	137
6.4.3 Entrenamiento de la red.....	139
6.4.4 Validación de la red.....	140
6.5 Entrenamiento de la Red Neuronal del Sistema Hidráulico	141
6.5.1 Resultado con programación manual.....	141
6.5.2 Resultados Utilizando Herramienta de Matlab	143
6.6 Validación de la Red Neuronal del Sistema Hidráulico.....	147
CAPÍTULO 7: Aspectos Económicos	149
Conclusiones y Recomendaciones	151
Conclusiones	151
Recomendaciones.....	152
Anexos	153
Anexo 1: Procedimiento para crear redes neuronales personalizadas en Matlab	153
Anexo 2: Características Técnicas del Aerogenerador Gamesa G52/850	160
Anexo 3: Rutinas de Mantenimiento Preventivo Realizadas en el PELS	163
Anexo 4: Determinación del Estado actual de los componentes del Sistema Hidráulico del Aerogenerador número 5.....	165
A.4.1 Verificación del Nivel de Aceite del Grupo Hidráulico	165
A.4.2 Estado Filtros de Aire	166

A.4.3 Test de Flujo y Válvula Proporcional	167
A.4.4 Test de Tope Positivo y Negativo	168
Referencias Bibliográficas.....	169

Índice de Figuras

Figura 1.1	Cantones que abastece Coopesantos.	21
Figura 1.2	Producción de Energía a nivel país en los últimos Años.	25
Figura 1.3	Porcentaje de Energía renovable en el 2015.	26
Figura 1.4	Distribución de la producción bruta de energía para el 2015 por fuente.	27
Figura 1.5	Distribución de Energía por empresa	30
Figura 1.6	Porcentaje de costo por tipo de Mantenimiento en El Parque Eólico Los Santos, (2014 – 2016).	31
Figura 1.7	Precio Promedio de Distribución Por Empresa, periodo 2012 – 2016.	32
Figura 1.8	Tareas a realizar	36
Figura 2.1	Función de Costo de la Confiabilidad.....	39
Figura 2.2	Variación del estado de un componente en f función del tiempo según la estrategia de mantenimiento utilizada.	51
Figura 2.3	(a) Red neuronal. (b) Representación biológica de una neurona.	53
Figura 2.4	Función de Activación sigmoideal	55
Figura 3.1	Aerogeneradores de eje horizontal y tres palas, Parque Eólico Los Santos.....	58
Figura 3.2	Componentes de un aerogenerador.....	59
Figura 3.3	Mecanismo de Orientación.....	61
Figura 3.4	Generador	62
Figura 3.5	Vista General y localización en el generador del Grupo hidráulico	65
Figura 3.6	Sistema Hidráulico Aerogeneradores Gamesa	66
Figura 3.7	Circuito Hidráulico que interviene en la carga de los acumuladores	67
Figura 3.8	Diagrama Grupo hidráulico	71
Figura 4.1	ANN para el rotor y el rodamiento principal.....	81
Figura 4.2	ANN para la caja multiplicadora	82
Figura 4.3	ANN para el generador eléctrico	82
Figura 4.4	Topología de la ANN para el Generador	95
Figura 4.5	Topología de la ANN para la Caja Multiplicadora.....	96
Figura 4.6	Topología de la ANN para el Sistema Hidráulico	97
Figura 4.7	Topología de la ANN para el rotor.....	97
Figura 5.1	Ubicación Parque Eólico Los Santos	98
Figura 5.2	Ubicación de Unidades Aerogeneradoras Parque Eólico Los Santos...	100
Figura 5.3	Pantalla Principal SGIPE.....	106
Figura 5.4	Pantalla de valores de operación de Góndola.....	107
Figura 5.5	Ventana de datos eléctricos de operación	108
Figura 5.6	Ventana con datos de temperatura de operación	108
Figura 5.7	Ventana con estados de operación del PLC	109
Figura 6.1	Topología de la ANN para el Sistema Hidráulico	134
Figura 6.2	Programación Red Neuronal Artificial Sistema Hidráulico.....	136
Figura 6.3	Parte 1 Función Backpropagation Sistema Hidráulico	137
Figura 6.4	Parte 2 Función Backpropagation Sistema Hidráulico	138
Figura 6.5	Código Entrenamiento Red Neuronal.....	139
Figura 6.6	Código para la Validación de la Red Neuronal.....	140

Figura 6.7	Media y desviación estándar del error.....	142
Figura 6.8	Comportamiento del Error Medio Cuadrático en las diferentes fases ...	144
Figura 6.9	Comportamiento de los Parámetros en el Entrenamiento	145
Figura 6.10	Error medio Cuadrático obtenido en el entrenamiento de la red	146
Figura 6.11	Comportamiento de la salida esperada y salida deseada en la validación de la red	147
Figura 6.12	Media y desviación estándar del error obtenido en la validación de la red.....	148

Índice de Gráficas

Gráfico 1.1	Costos generales de explotación de los parques eólicos.	29
Gráfico 2.1	Distribución acumulada de la distribución Weibull.....	44
Gráfico 2.2	Función de Confiabilidad de la Distribución Weibull.	44
Gráfico 2.3	Función de la Tasa de Riesgo de la Distribución Weibull.	45
Gráfico 2.4	Función de Distribución Acumulada de la distribución Normal.	46
Gráfico 2.5	Función de confiabilidad de La distribución normal.	47
Gráfico 2.6	Función de la tasa de riesgo de la Distribución normal.	48
Gráfico 3.1	Tiempos de paro para subsistemas de turbinas eólicas en Reino Unido	74
Gráfico 3.2	Tiempos de paro por componente de turbinas eólicas en Suecia	75
Gráfico 3.3	Tiempos de paro por componente de turbinas eólicas en Finlandia.....	76
Gráfico 3.4	Tiempos de paro por componente de turbinas eólicas en Alemania.	77
Gráfico 4.1	Costos de mantenimiento por sistema.....	84
Gráfico 4.2	Pareto de costos de mantenimiento por sistema	84
Gráfico 4.3	Tiempos requeridos de mantenimiento por sistema	85
Gráfico 4.4	Pareto de tiempos requeridos de mantenimiento por sistema	85
Gráfico 4.5	Costos por sistema del mantenimiento correctivo	87
Gráfico 4.6	Pareto de Costos por sistemas para el mantenimiento correctivo	88
Gráfico 4.7	Tiempo requerido de mantenimiento por sistema para el mantenimiento correctivo.....	88
Gráfico 4.8	Pareto de tiempo requerido de mantenimiento por sistema para el mantenimiento correctivo	89
Gráfico 4.9	Costos por sistema para mantenimiento preventivo	90
Gráfico 4.10	Pareto de Costos por sistemas para el mantenimiento preventivo	91
Gráfico 4.11	Tiempos requeridos de mantenimiento por sistema para mantenimiento preventivo.....	92
Gráfico 4.12	Pareto de tiempo requerido de mantenimiento por sistema para mantenimiento preventivo	93
Gráfico 5.1	Porcentaje de Costos por Tipo de Mantenimiento	117
Gráfico 5.2	Porcentaje de la Distribución de Costos de Mantenimiento.....	118
Gráfico 5.3	Porcentaje de Costos por Aerogenerador	119
Gráfico 5.4	Porcentaje de Costos por Mantenimiento Preventivo por Aerogenerador	120

Gráfico 5.5 Pareto de los costos de Mantenimiento Preventivo Por Aerogenerador	120
Gráfico 5.6 Porcentaje de los costos de Mantenimiento correctivo Por Aerogenerador	121
Gráfico 5.7 Pareto de Costos de Mantenimiento por Aerogenerador.....	122
Gráfico 5.8 Distribución de Costos de Mantenimiento Aerogenerador 5.....	123
Gráfico 6.1 Variación de las Variables de Condición ante una falla en el sistema .	127

Índice de Tablas

Tabla 1.1	Características de los Aerogeneradores Proyecto Eólico Los Santos	23
Tabla 3.1	Componentes del sistema Hidráulico.....	72
Tabla 4.1	Costos de mantenimiento correctivo por sistema	89
Tabla 4.2	Costos de mantenimiento preventivo por sistema	93
Tabla 5.1	Ubicación de los Aerogeneradores en las Fincas del Parque Eólico Los Santos.....	99
Tabla 5.1	Rutina de Mantenimiento Preventivo del Grupo Hidráulico del Aerogenerador número 5 PELS.....	111
Tabla 5.2	Rutina de Mantenimiento Preventivo del Sistema de Freno del Aerogenerador número 5 PELS.....	112
Tabla 5.3	Rutina de Mantenimiento Preventivo del Sistema de Pitch del Aerogenerador número 5 PELS.....	113
Tabla 5.4	Rutina de Mantenimiento Preventivo del Sistema Yaw del Aerogenerador número 5 PELS.....	115
Tabla 6.5	Parámetros de la distribución Weibull para el tiempo de falla de los principales componentes.	134
Tabla 7.1	Costos Asociados a la creación de la red Neuronal del Sistema hidráulico	149

Resumen

En el presente proyecto se desarrolla el diseño de una metodología basada en redes neuronales artificiales para la predicción de la vida útil acumulada del sistema hidráulico de un aerogenerador G52/850 instalado en el Parque Eólico Los Santos.

Se inicia con un estudio de los componentes que conforman el sistema hidráulico, así como de las señales analógicas que se obtienen de él, correspondientes a las variables de condición que se pueden monitorear gracias al software SGIPE.

Seguidamente, se realizaron inspecciones y pruebas a los diferentes elementos del sistema hidráulico para poder determinar la condición actual de los componentes de este sistema, y con base en la variación de los valores de las variables de condición al presentarse una falla, se determinan cuáles de estas representan mejor la vida útil de este.

Se extraen los datos de las variables de condición seleccionadas comprendidas entre noviembre del 2014, hasta septiembre del 2016. Se realizó la programación de la red neuronal del sistema hidráulico, utilizando el software Matlab, programando en este los algoritmos de entrenamiento y validación de la misma.

Finalmente, se utiliza el 80% de los datos de las variables de condición seleccionadas para el entrenamiento de la red y el 20% para la validación de la misma, obteniendo como resultado la Red Neuronal del Sistema Hidráulico lista para su implementación.

Palabras Clave

Red Neuronal Artificial, Pruebas de Condición al Sistema Hidráulico, Variables de Condición, Parque Eólico Los Santos, Aerogenerador.

Abstract

In this project, it is developed the design of a methodology based on artificial neural networks, in order to predict the useful life accumulated of the hydraulic system of a G52/850 wind turbine developed at the Parque Eólico Los Santos.

It begins with a study of the components that make up the hydraulic system, as well as, the analog signals obtained from it, corresponding to the condition variables that can be monitored thanks to the software SGIPE.

Then, Inspections and testing of the different elements of the hydraulic system were carried out, in order to determine the current condition of the components of this system, and based on the variation of the condition variables when a fault occurs, it will determine which of these best represent the useful life of a component.

Data are extracted from the selected condition variables from November 2014 to September 2016. The neural network of the hydraulic system was programmed, using the Matlab software, programming in this training and validation of the algorithms.

Finally, 80% of the data from the condition variables selected for the training of the network are used and 20% for the validation of the same, obtaining as a result the Neural Network of the Hydraulic System ready for its implementation.

Keywords

Artificial Neural Network, Tests of Condition to the Hydraulic System, Variables of Condition, Parque Eólico Los Santos, Wind Turbine.

Acrónimos

- ANN** – Artificial Neural Networks (Redes Neuronales Artificiales)
- ARESEP** – Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
- CBM** – Condition Based Maintenance (Mantenimiento basado en condición)
- CENCE** – Centro Nacional de Control de Energía de Costa Rica
- COOPESANTOS** – Cooperativa de Electrificación Rural Los Santos
- ICE** – Instituto Costarricense de Electricidad
- O&M** – Operación y Mantenimiento
- PELS** – Parque Eólico Los Santos
- PG** – Presión Grupo Hidráulico
- PY** – Presión Freno de Yaw
- SGIPE** – Sistema de Gestión Integral de Parques Eólicos (GAMESA)
- SMP** – Sistema de Mantenimiento Predictivo (GAMESA)
- TG** – Temperatura de Aceite Hidráulico
- TMEF** – Tiempo medio entre Fallas
- TMPR** – Tiempo medio entre Reparación

CAPÍTULO 1: Introducción

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

1.1 Reseña de la Empresa

COOPESANTOS R.L., se funda el 17 de enero de 1965 en San Cristóbal Norte de Desamparados, es una cooperativa que se encarga de la distribución de energía a los cantones de Dota, Tarrazú, León Cortés y Acosta y la parte Sur y Oeste de los cantones de Aserri, Mora, Desamparados, el Guarco y El Cantón Central, estos últimos dos de la provincia de Cartago.

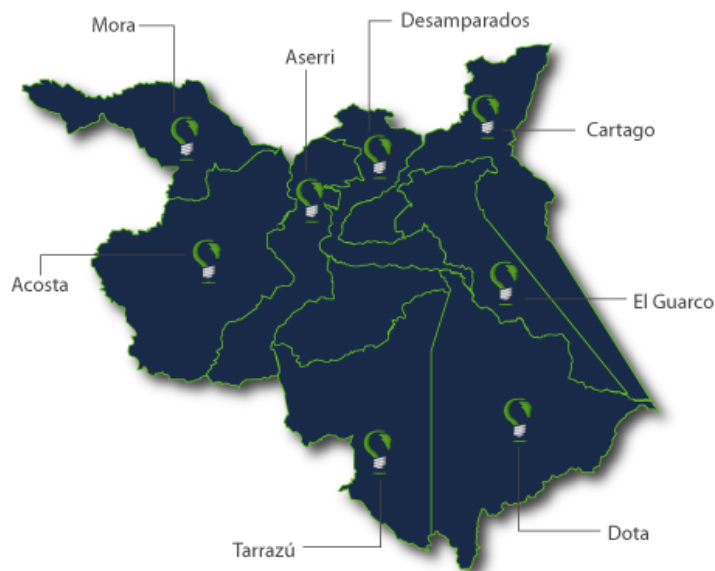


Figura 1.1 Cantones que abastece COOPESANTOS.

Fuente: COOPESANTOS (2016)

Actualmente presenta cuatro líneas de negocio: Distribución de energía, Generación de energía, Info-comunicaciones y DITEM. (COOPESANTOS R.L, 2016)

A continuación se cita la misión de COOPESANTOS: 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. (COOPESANTOS R.L., 2016)

Seguidamente se muestra la visión de COOPESANTOS: Consolidar el bienestar y desarrollo de nuestros asociados, siendo líderes en bienes y servicios eficientes y personalizados de energía e Info-comunicaciones. (COOPESANTOS R.L., 2016)

1.2 Descripción del proceso

Como COOPESANTOS cuenta con cuatro líneas de Negocio, se detallará el área interés para este proyecto, la cual se refiere a la línea de generación de energía.

En esta área, COOPESANTOS cuenta con un proyecto hidroeléctrico y un parque eólico propio, los cuales son: El proyecto Hidroeléctrico San Joaquín Los Santos y el Parque Eólico Los Santos.

1.2.1 Proyecto Hidroeléctrico San Joaquín Los Santos

El proyecto Hidroeléctrico San Joaquín Los Santos, se desarrollaría en los cantones de Tarrazú y Dota de la provincia de San José. Abarcará un área de 160 hectáreas con un área de influencia de 500 hectáreas. Está concebido como un proyecto de tres etapas consecutivas y aprovechará los causes del Río Naranjo y el Río San Joaquín. Se prevé que en promedio el proyecto generará 133 GWh/año y tendrá un costo aproximado de \$92,5 millones para un promedio de \$1 900 por kW instalado. (COOPESANTOS R.L., 2016)

Dicho proyecto se encuentra en proceso de planificación, y se provee que no se desarrollará, hasta que haya una demanda suficiente de energía que justifique su construcción.

1.2.2 Parque Eólico Los Santos

El Parque Eólico Los Santos, ubicado sobre la carretera Interamericana sur, entre casa Mata de Desamparados y La Paz de El Guarco, cuenta con 15 aerogeneradores Marca GAMESA, cada máquina tiene una capacidad unitaria de 850 kW (kilowatts), Estos aerogeneradores se enfrentan a vientos de más de 10 m/s provenientes del noreste y sureste del país. (COOPESANTOS R.L., 2016)

En la siguiente tabla se presentan algunas de las características de los aerogeneradores instalados en el proyecto eólico de Los Santos.

Tabla 1.1 Características de los Aerogeneradores Proyecto Eólico Los Santos

Descripción	
Marca	Gamesa Eólica
Modelo	G52/850 kW
Altura de Torre	44 m
Longitud de Aspas	25,3 m
Diámetro de Rotor	52 m
Distancias entre las torres	100 m

Fuente: (COOPESANTOS R.L., 2016)

1.3 Objetivos del Proyecto

1.3.1 Objetivo General

1. Diseñar 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, para mayo 2017.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar el funcionamiento del sistema hidráulico de los aerogeneradores G52/850 y el procesamiento de las señales analógicas que se obtendrán de él, para marzo 2017.
2. Evaluar el estado actual de los componentes del sistema hidráulico (Grupo Hidráulico, Sistema de Freno, Sistema de Pitch, Sistema de Yaw), de un aerogenerador del Parque Eólico Los Santos, para marzo 2017.
3. Determinar las variables que representan de mejor manera la predicción de la vida útil del sistema hidráulico en estudio, para mayo 2017.
4. Diseñar una red neuronal artificial para la predicción de vida útil acumulada del sistema hidráulico de un aerogenerador, a través del software Matlab, para abril 2017
5. Calcular los costos asociados al diseño de la metodología basada en redes neuronales artificiales para la predicción de vida útil acumulada del sistema hidráulico, para mayo 2017.

1.4 Descripción del Proyecto

En los últimos años la capacidad instalada para la generación de la energía eólica ha venido en aumento a nivel país, hasta llegar a alcanzar los 268 MW, esto según el informe anual del Centro Nacional de Control de Energía.

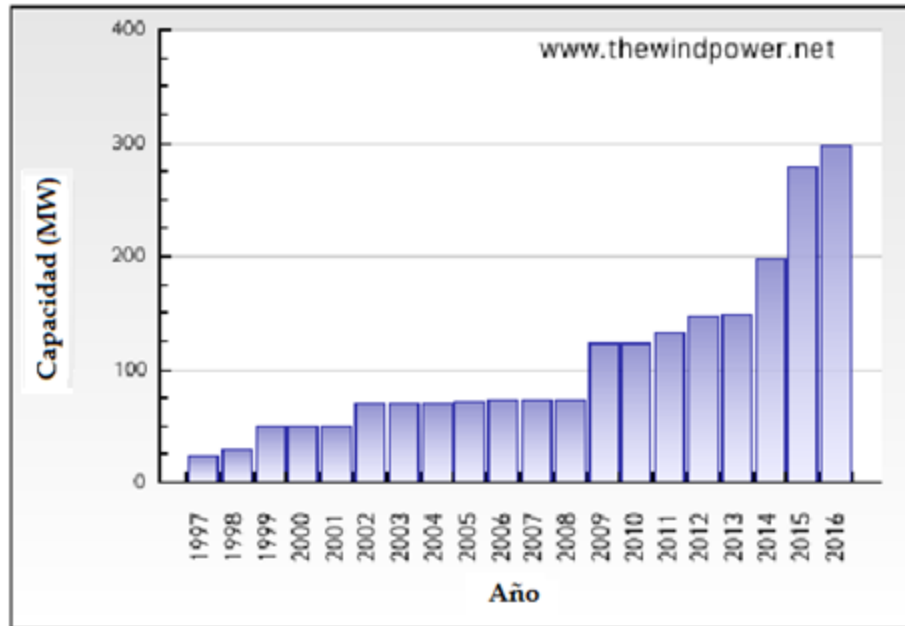


Figura 1.2 Producción de Energía a nivel país en los últimos Años.

Fuente: The Wind Power, 2016

Para el 2016, el país ha logrado producir el 98,21% de su energía eléctrica con energías renovables, la energía eólica representa un 10,64% de la energía generada.

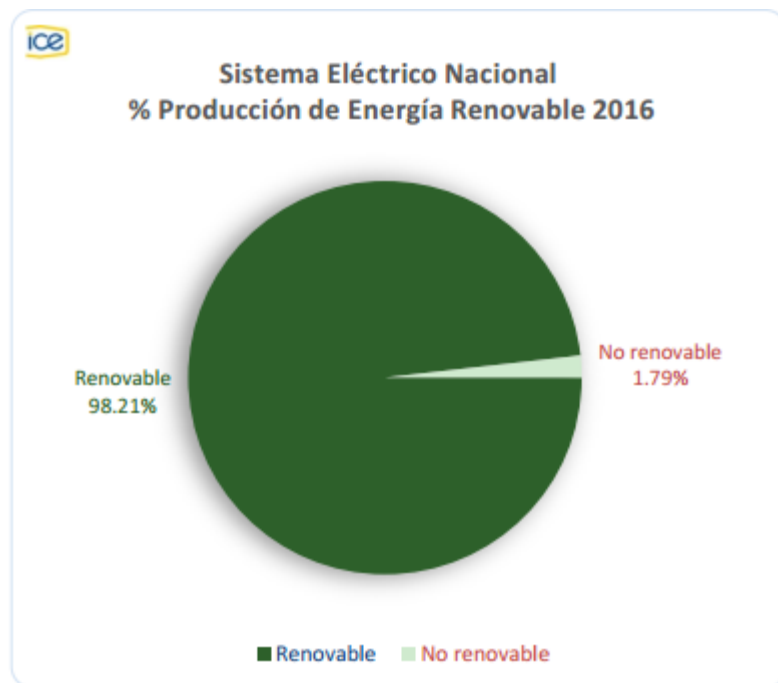


Figura 1.3 Porcentaje de Energía renovable en el 2016.

Fuente: Centro Nacional de Control de Energía

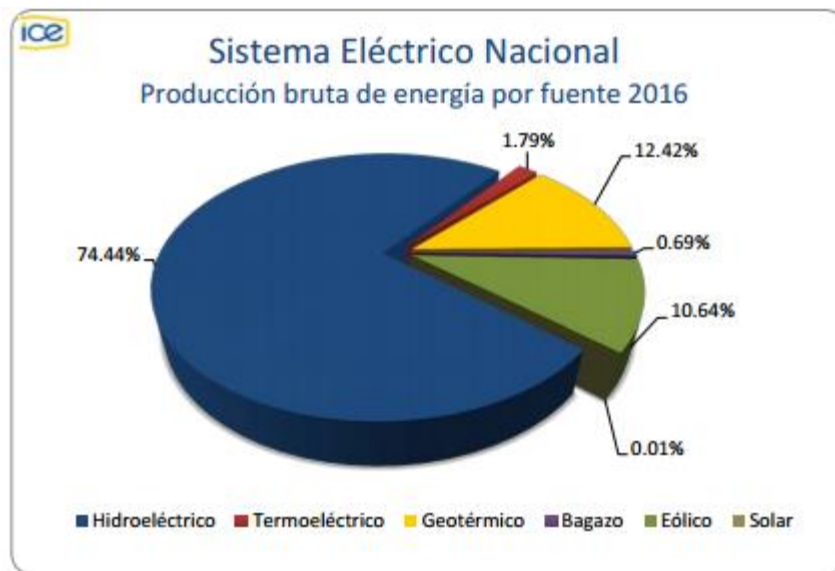


Figura 1.4 Distribución de la producción bruta de energía para el 2016 por fuente.

Fuente: Centro Nacional de Control de Energía

El país tiene la meta de convertirse en un país carbono neutral, y uno de los grandes pasos que debe realizar para esto, es generar el 100% de su energía eléctrica con fuentes de energía renovable, como se puede observar en los informes generados por el Centro Nacional de Control de Energía, esto está cerca de conseguirse, ya que actualmente se tiene que este porcentaje está en un 98,21%.

La energía eólica si bien no es una fuente tan representativa como la energía hidroeléctrica, es un tipo de energía que se está incrementando a nivel país. Para este año se tiene planificada la construcción de cinco nuevas plantas de compañías privadas, y para el 2017, se espera la construcción de un nuevo parque perteneciente a la Compañía Nacional de Fuerza y Luz.

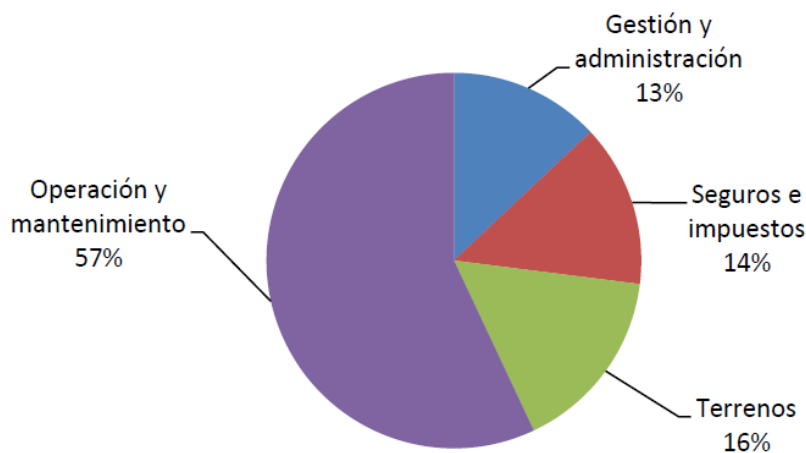
De acuerdo con la planificación del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Costa Rica duplicará la generación de electricidad a partir del viento entre 2015 y 2017. Así, la capacidad eólica del país pasará de 194 MW, a inicios del 2015 a 393 MW al 2017, haciendo que la producción eólica pase de 7% a 10,5% (Lara, 2015)

Además la energía eólica, aparte de contribuir a la carbono neutralidad del país, es una energía que presenta su mayor producción en los meses de diciembre y marzo, lo que coincide con la época seca del país, en la cual el caudal de los ríos se ve disminuido por lo que se afecta la producción de energía hidroeléctrica, es por esto que se tiene que la energía eólica es una excelente fuente para complementar el uso de energía hidroeléctrica.

1.5 Motivaciones

Una desventaja de la producción de energía mediante turbinas de viento, consiste en los altos costos que se deben incurrir en la operación y mantenimiento de los mismos, en la siguiente grafica se puede observar que a nivel de parques eólicos, la operación y mantenimiento de los mismos corresponde a más del 50% de los costos de explotación de los parques eólicos.

Gráfico 1.1 Costos generales de explotación de los parques eólicos.



Fuente: Loria (2016)

COOPESANTOS R.L., con su Parque Eólico Los Santos no escapa de esta situación. Dicha Cooperativa aporta a la generación por energía eólica con su proyecto ubicado en la zona norte de San Cristóbal, representando el 0,41% de la producción de energía eólica del país.

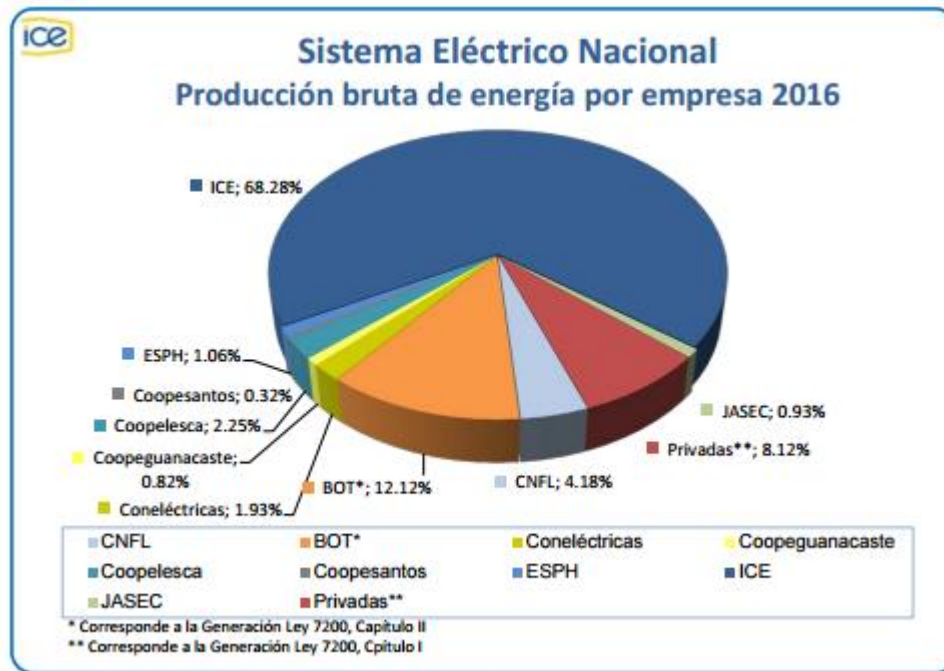


Figura 1.5 Distribución de Energía por empresa (2016)

Fuente: Centro Nacional de Control de Energía

El Parque Eólico Los Santos, cuenta con 15 unidades aero-generadoras, con una capacidad total instalada de producción de 12 750 kW, actualmente sus modelos de mantenimiento se centran principalmente en realizar mantenimiento correctivo o preventivo, por lo que principalmente se basan en las recomendaciones del fabricante, este sistema de mantenimiento, si bien ha permitido mantener el parque eólico en las condiciones adecuadas para su operación, se le asocia un alto costo de mantenimiento, ya que al apearse a las recomendaciones del fabricante no se contempla el estado actual de los equipos, lo que puede utilizarse como un indicador para predecir una falla y así evitar el mantenimiento correctivo, el cual como se sabe, es un tipo de mantenimiento al cual se le asocia un alto costo, en el caso particular del Parque Eólico Los Santos, los costos por mantenimiento correctivo representan el 66% de los costos de mantenimiento.

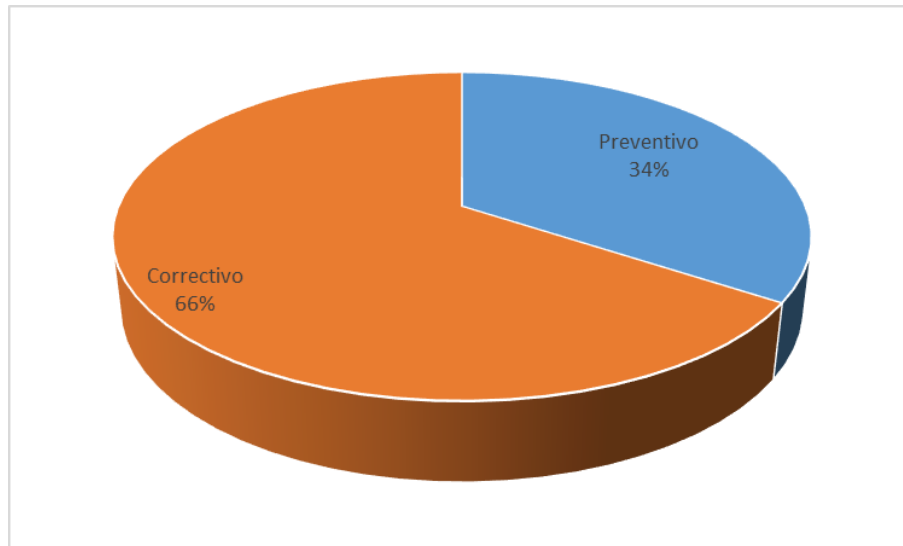


Figura 1.6 Porcentaje de costo por tipo de Mantenimiento en El Parque Eólico Los Santos, (2014 – 2016)

Fuente: (Bogantes, 2016)

Esta situación aumenta los costos de generación de la energía, ya que se tiene que invertir más recursos en el mantenimiento y los tiempos de fallo son mayores, pues como lo menciona el Ing. Bryan Bogantes en su investigación realizada:

En la industria eólica, aun se tienen problemas de falla en componentes de manera prematura, lo que aumenta los costos de Operación y Mantenimiento. Por lo que estas estrategias de mantenimiento basado en la condición tienen como principal objetivo garantizar que los costos de Operación y Mantenimiento sean los mínimos, a través de la reducción de paro de los aerogeneradores y con el aumento de confiabilidad de estos equipos. (Bogantes, 2016)

Actualmente, COOPESANTOS, es la empresa que presenta las mayores tarifas a nivel país en la distribución de energía, lo que trae consigo el descontento de sus usuarios, ya que estos deben pagar aproximadamente, un 32% más por cada kilowatt hora que consumen. Por ejemplo, a nivel industrial COOPESANTOS tiene una tarifa promedio de 168,78 ¢/kWh, mientras que el ICE, quien es la segunda compañía con la venta de energía más cara es de 124,91 ¢/kWh, por lo que los usuarios de COOPESANTOS estarían pagando 43,87 ¢/kWh más. (ARESEP,2016)



Figura 1.7 Precio Promedio de Distribución Por Empresa, periodo 2012 – 2016.

Fuente: ARESEP (2016)

Esto evidencia la necesidad que tiene la empresa de realizar un cambio de mentalidad, y abrirse a nuevas opciones que reduzcan los costos por el mantenimiento de los aerogeneradores, mejorar la confiabilidad de los equipos-y-disminuir-los-tiempos-de-fallos-que-se-puedan-presentar.

La investigación realizada por la Ingeniera Loria en el 2016, demuestra el impacto que este tipo de mantenimiento tiene sobre los costos de mantenimiento, y plantea una alternativa innovadora, la cual consiste en implementar un diseño de una metodología basada en redes neuronales artificiales para la predicción de vida útil acumulada de los aerogeneradores G87/2000, instalados en el parque Eólico Orosí, con el cual se pretende dar un mantenimiento eficiente que se adapte a la condición actual de los equipos y minimice los costos por mantenimiento.

Así mismo, la investigación realizada por el Ingeniero Bryan Bogantes demostró que los sistemas críticos de los aerogeneradores G52/850 instalados en el parque eólico de COOPESANTOS son el generador, la caja multiplicadora, el rotor, y el sistema hidráulico.

Para el monitoreo de las condiciones de estos componentes ya se cuentan con un sistema de adquisición de datos para los diferentes sistemas del equipo, únicamente falta la instalación de un sistema de adquisición de datos para el análisis de vibraciones, el cual gracias a su planteamiento ya está en proceso de instalación, por lo que el siguiente paso debe ser el planteamiento de un mantenimiento que se base en las variables obtenidos mediante el sistema de adquisición de datos.

Es por esto que se debe plantear un modelo de mantenimiento que se base en la condición de los equipos, por lo que se propone utilizar el modelo planteado por la Ingeniera Loria. Para poder aplicar esta metodología, es necesario contar con un historial de las condiciones de los elementos, mínimo de un año, por lo que se tiene que aún no es posible aplicar este modelo a todos los componentes de los aerogeneradores, ya que la documentación de los datos de las vibraciones de los elementos iniciaría hasta que se instalen el sistema de adquisición de datos para las vibraciones.

Por lo que este proyecto estará enfocado en iniciar con un plan piloto, en el que se aplicará el 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.

1.6 Metodología

Seguidamente se muestran las etapas que se realizarán para la elaboración de este proyecto, así como sus objetivos asociados y sus respectivas actividades.

ETAPA	OBJETIVO ASOCIADO	ACTIVIDADES
0. Análisis del modelo de diagnóstico y pronóstico de condición mediante redes neuronales. (Febrero 2017)	Comprender el modelo diagnóstico y pronóstico bajo un proceso de deterioro multi-estado, desarrollado en el Laboratorio en Confiabilidad de la Universidad de Alberta en Canadá.	<ul style="list-style-type: none"> • Analizar el trabajo realizado por la Ingeniera Ana Laura Loria García. • Obtener otras referencias relacionadas con las redes neuronales artificiales. • Seleccionar la información de mayor interés. • Procesar la información seleccionada.
0. Análisis de la estructura planteada para aplicar el modelo de diagnóstico y pronóstico multi-estado mediante redes neuronales en los aerogeneradores de COOPESANTOS. (Febrero 2017)	Estudiar la estructura necesaria para la implementación del modelo en estudio para las turbinas de COOPESANTOS.	<ul style="list-style-type: none"> • Analizar el trabajo realizado por el Ingeniero Bryan Bogantes. • Obtener mayor información acerca de los elementos necesarios que se proponen. • Seleccionar la información de mayor interés. • Procesar la información seleccionada.
1. Determinación del estado actual del sistema	Determinar el estado actual en el que se encuentra cada	<ul style="list-style-type: none"> • Conocer las partes que integran el

Hidráulico. (Marzo 2017)	componente del sistema hidráulico, haciendo uso de los historiales de las variables de condición monitoreadas, así como los registros de mantenimiento que lo involucren.	sistema hidráulico. <ul style="list-style-type: none"> • Analizar el historial de fallas asociado a este sistema. • Determinar el estado en el que se encuentra el sistema hidráulico.
2. Estudio de las variables que determinan el estado del sistema. (Mayo 2017)	Determinar las variables que representan mejor la condición del sistema hidráulico, para utilizarlas en el diseño de la metodología planteada.	<ul style="list-style-type: none"> • Analizar los historiales que se tienen de la presión y temperatura del sistema hidráulico, así como los análisis de aceite que se le han realizado hasta el momento. • Comprobar que las variables en estudio realmente reflejan la condición de los elementos y pueden utilizarse para predecir su vida útil.
3. Planteamiento de la red neuronal artificial del sistema hidráulico. (Abril 2017)	Plantear la red neuronal artificial del sistema hidráulico.	<ul style="list-style-type: none"> • Con base en las variables determinadas en la etapa anterior, determinar la estructura de la red neuronal artificial. • Definir el porcentaje de datos que se utilizaran para el entrenamiento de la red y para la validación de la misma.
4. Programación de la Red neuronal Artificial. (Mayo 2017)	Realizar la programación en el software Matlab de la red neuronal artificial planteada.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar el software Matlab para la programación de la red neuronal. • Realizar las pruebas necesarias para comprobar que el programa esté listo para implementarse

		en el sistema hidráulico de los aerogeneradores.
--	--	--

1.7 Cronograma

En las siguientes imágenes se muestra el cronograma planteado para la realización del proyecto, iniciando el 6 de febrero de 2017 y finalizando el 7 de junio de 2017.

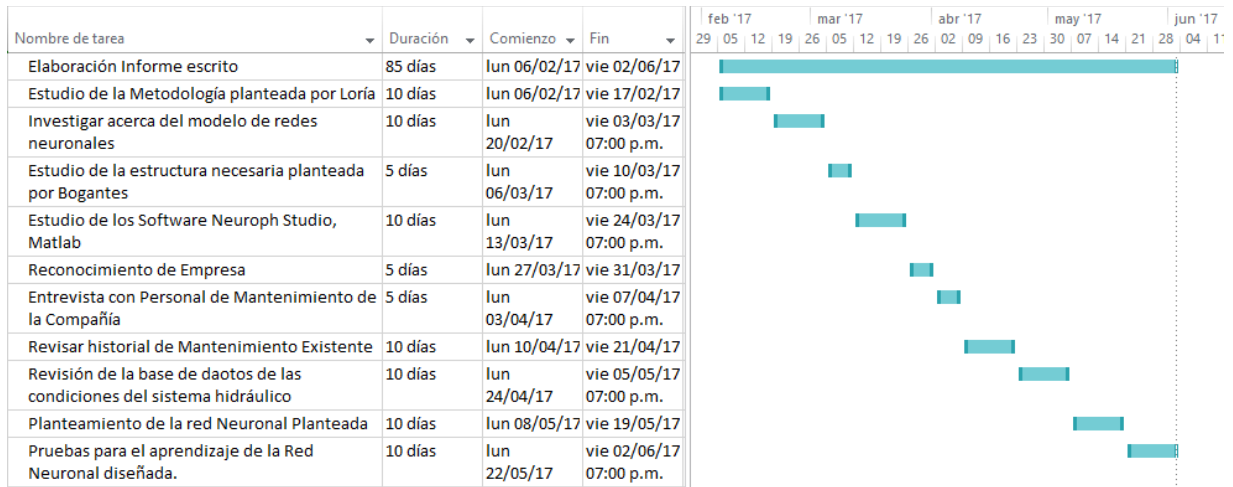


Figura 1.8 Tareas a realizar

Fuente: Elaboración propia (Microsoft Project, 2016)

1.8 Alcance del proyecto

Este proyecto tiene como alcance establecer el 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. Además, se verificará los datos necesarios para poder aplicar la metodología al sistema hidráulico.

Por lo que se determinará la condición actual del sistema hidráulico de un aerogenerador, para plantear la metodología basada en la predicción mediante redes neuronales artificiales, partiendo de estas condiciones.

El entregable final será un informe escrito, donde se detallará el diseño planteado para la implementación en el sistema hidráulico de los aerogeneradores. Además, se entregará la programación realizada para la predicción del estado actual del sistema hidráulico de los aerogeneradores G52/850, para su posterior entrenamiento, validación y uso de la red neuronal artificial diseñada.

1.9 Limitaciones del proyecto

Este tipo de proyecto está dando sus primeros pasos a nivel país, por lo que se puede categorizar como un proyecto innovador, esto limita la cantidad de información que se pueda encontrar, ya que COOPESANTOS vendría a ser el pionero en esta área.

Por otra parte, este proyecto podría tener mayores alcances si ya se contara con el historial de todas las variables de interés para aplicar el modelo, por lo que momentáneamente, solamente se planteará para el sistema hidráulico.

CAPÍTULO 2: Marco Conceptual

En el presente capítulo se desarrollarán conceptos necesarios para la comprensión de un modelo de mantenimiento basado en la condición utilizando redes neuronales artificiales para la predicción de la vida útil acumulada del sistema hidráulico de un aerogenerador G52/850 instalados en el Parque Eólico Los Santos. Se definen conceptos como: Ingeniería de Confiabilidad, Probabilidad y Estadística, mantenimiento selectivo, redes neuronales artificiales, y los Tipos de Mantenimiento.

2.1 Ingeniería de Confiabilidad

La confiabilidad se puede definir como la probabilidad, bajo condiciones operativas previamente definidas, de que un componente o sistema, cumpla su funcionamiento en un lapso de tiempo establecido. (Acuña, 2003)

La ingeniería de confiabilidad está relacionada directamente con el plan de mantenimiento que se lleve a cabo, y el grado de seguridad de que un dispositivo o equipo funcione en condiciones óptimas por un periodo determinado.

Para describir la confiabilidad de un sistema, es necesario especificar los siguientes datos:

- i. El proceso de falla
- ii. La configuración que describe la manera en la cual se encuentra conectado el sistema.
- iii. El estado para el cual se define que el sistema se encuentra en falla.

De estas especificaciones se tiene que: las leyes de probabilidad que gobiernan las fallas se relacionan con el proceso de falla, la forma en la cual se comporta la función de confiabilidad del sistema está definida como la configuración de dicho sistema, las reglas de operación del sistema son definidas en función de la demanda y finalmente, el estado para el cual se define que el sistema se encuentra en falla se refiere a las condiciones de falla del sistema.

2.1.1 Costos de la confiabilidad

Zapata (2011), menciona que el nivel de confiabilidad, es proporcional al nivel de inversión requerida y viceversa, por lo que los costos de esta, deben ser comparados con los beneficios globales tanto para el usuario como para la sociedad.

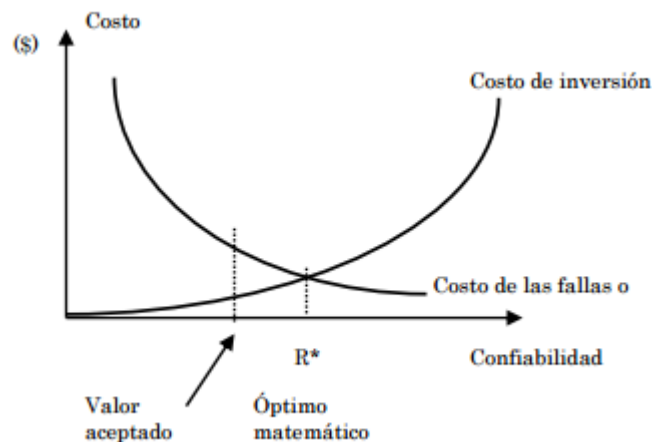


Figura 2.1 Función de Costo de la Confiabilidad

Fuente: Zapata, (2011)

Por lo que el nivel de confiabilidad aceptable, dependerá de esta relación, y se establecerá dependiendo de lo que el usuario esté dispuesto a pagar. Este nivel de confiabilidad, no siempre considera con el nivel óptimo matemático, ya que en muchos casos, la disposición del usuario obliga a que este sea menor.

2.1.2 Necesidad del modelo de la confiabilidad

Debido a la complejidad que presentan actualmente los diferentes sistemas, en cuanto a tamaño, características especiales y estructuras complejas, surge la necesidad de crear modelos de confiabilidad para evitar consecuencias mayores al ocurrir una falla en algunos de estos sistemas, como pueden ser pérdidas económicas considerables, afectación de la salud y bienestar de los colaboradores y daños al medio ambiente. (Loria, 2016)

Para evitar estas situaciones, es necesario aplicar nuevas estrategias de mantenimiento, que se basen en un monitoreo continuo de la condición del sistema, para poder predecir posibles fallas para dar una atención oportuna y asegurar así la confiabilidad de dicho sistema.

2.2 Probabilidad y Estadística en la Confiabilidad

La confiabilidad se determina a través de métodos probabilísticos y estadísticos, por lo que es importante conocer el concepto de probabilidad, el cual se centra en el estudio de ocurrencia de experimentos aleatorios, lo cual tiene como objetivo, asignar un valor a la ocurrencia futura de un evento, cuyo valor se encontrara entre 0 (cuando sus posibilidades son casi nulas) o 1 (cuando se tienen altas posibilidades de ocurrencia). (Acuña, 2003)

Este dato es vital para conocer la probabilidad de la ocurrencia de una falla en un sistema, y así saber cuál es la confiabilidad de dicho sistema, y así poder tomar decisiones sobre la optimización del mantenimiento.

Las principales distribuciones de probabilidad que se utilizan para la descripción del proceso de falla son: Weibull y Normal. Este tipo de distribuciones son utilizadas, ya que para el cálculo de la confiabilidad, se utiliza la variable tiempo, la cual es una variable aleatoria, continua y que solamente puede tomar valores positivos. (Loria, 2016)

2.2.1 Variables Aleatorias

Las variables aleatorias son definidas por Acuña (2013), como “una variable cuya ocurrencia depende únicamente y exclusivamente del azar.” Las cuales al ser agrupadas en diferentes clases, sirven para ajustar distribuciones de probabilidad, las cuales a su vez, son utilizadas para calcular probabilidades de ocurrencias de la variable dentro de su intervalo matemático de comportamiento.

Estas se pueden clasificar en tres grupos:

1. Empíricas: La cual es una distribución truncada, ósea que los valores que pueden tomar las variables están comprendidos entre el valor menor y el valor mayor del conjunto de datos que dio origen a la distribución.
2. Variables Aleatorias Discretas: Estas variables solo pueden tomar los valores extremos de un intervalo y se asocian generalmente a una situación de conteo.
3. Variables Aleatorias Continuas: Estas pueden tomar cualquier valor en un intervalo, y se representan por el conjunto de los números reales.

2.2.2 Función de Distribución Acumulada

La función de distribución acumulada es la probabilidad de que la variable aleatoria en estudio, tome algún valor menor o igual que un valor dado, y el dominio de dicha función incluye a todos los números reales. (Ojeda, 2007)

Jardine & Tsang (2013) establecen que en el análisis del mantenimiento, el interés se centra en la probabilidad de ocurrencia de la falla antes de un tiempo específico. En la Ecuación 2.1, se puede observar la manera de calcular la distribución acumulada, la cual se expresa como $F(t)$.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

Ecuación 2.1

2.2.3 Función de Confiabilidad

Determina la probabilidad de que el equipo sobreviva hasta un tiempo específico t . Se conoce también como la función de supervivencia, la cual corresponde a una función complementaria de la función de distribución acumulada. Se denota como $R(t)$, su expresión se puede observar en la Ecuación 2.2.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - F(t) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

2.2.4 Tasa de Riesgo

Se puede definir como la probabilidad que un componente falle en el próximo intervalo, ya que se encuentra en funcionamiento al inicio de éste. (Jardine & Tsang 2013). Se encuentra dado por la probabilidad condicional, la cual se muestra en la Ecuación 2.3.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

La tasa de riesgo permite saber el momento óptimo, en función del costo mínimo para aplicar un remplazo preventivo, sin que esta acción resulte adversa para el sistema.

La distribución de los componentes o de un sistema, hace variar tanto la función de distribución acumulada, como la función de confiabilidad y la función de densidad de probabilidad, por lo que seguidamente, se detallarán las distribuciones de mayor uso en el área del mantenimiento.

2.2.5 Distribución Weibull

La función de distribución Weibull, tiene la versatilidad de adaptarse a diferentes formas dependiendo de los valores que tengan sus parámetros. (Moreno, Aguilar, Hernández, & Soto, 2016)

Es por esta versatilidad de la función que es la más utilizada, ya que dependiendo de los valores que sus parámetros tomen, puede comportarse como otro tipo de función, por ejemplo: si el parámetro de forma (β) sea igual a uno, se comporta como la distribución exponencial.

En la Ecuación 2.4, Ecuación 2.5 y la Ecuación 2.6, se muestra la función de densidad de probabilidad, confiabilidad y tasa de riesgo, respectivamente para la distribución Weibull. Y en el Gráfico 2.1, Gráfico 2.2 y el Gráfico 2.3, se muestra la gráfica de dichas funciones.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}; t \geq 0$$

Ecuación 2.4

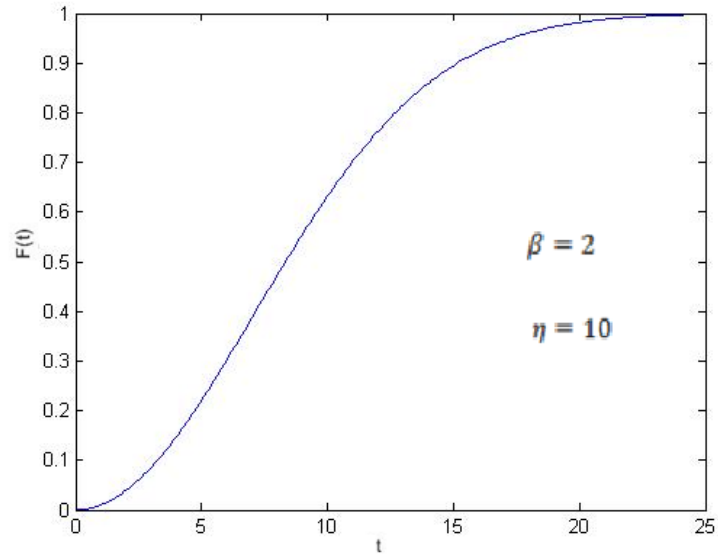
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}; t \geq 0$$

Ecuación 2.5

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

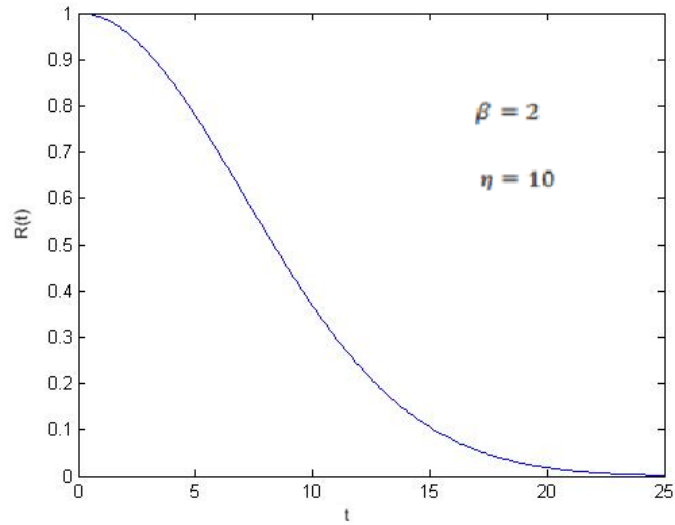
Ecuación 2.6

Gráfico 2.1 Distribución acumulada de la distribución Weibull



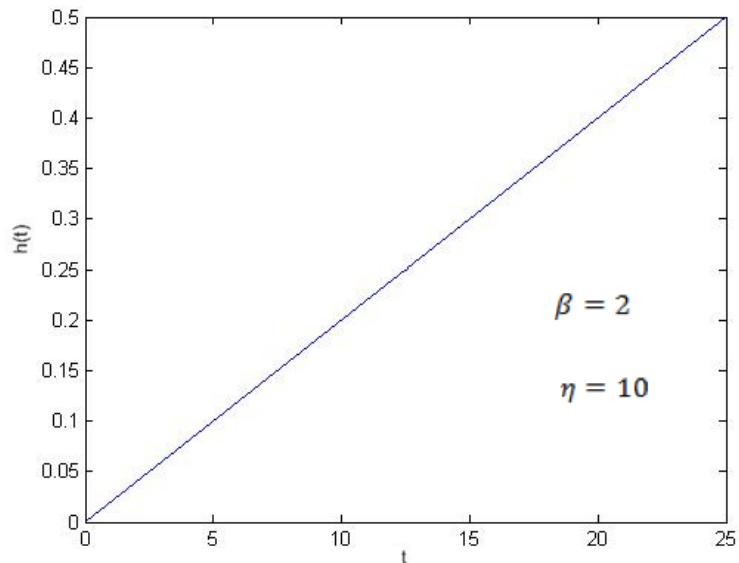
Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

Gráfico 2.2 Función de Confiabilidad de la Distribución Weibull.



Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

Gráfico 2.3 Función de la Tasa de Riesgo de la Distribución Weibull.



Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

2.2.6 Distribución Normal

Reconocida por primera vez por Abraham de Moivre (1667-1754), seguidamente en 1777 Carl Friedrich Gauss la profundiza, y formula la ecuación de la curva “campana de Gauss”. La distribución que tendrá una variable normal está determinada por su media y su desviación estándar. (Pértegas Díaz & Pita Fernández, 2001)

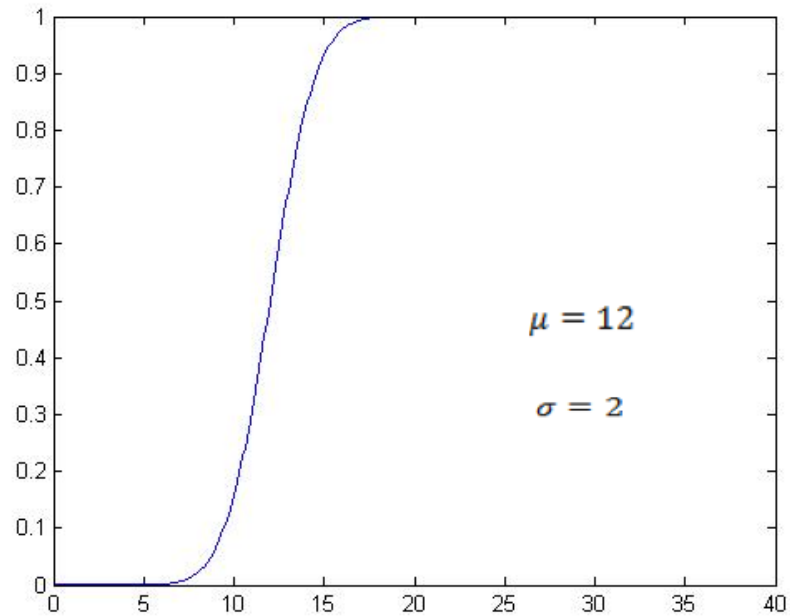
Por lo que la densidad de la norma se desarrolla mediante la Ecuación 2.7.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}; -\infty < t < \infty \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Este tipo de distribución posee una única moda, la cual coincide con su media y su mediana, así mismo, este tipo de distribución permite cualquier tipo de valor entre más y menos infinito, es simétrica respecto a su media, y la forma de la campana de Gauss estará determinada por los parámetros μ y σ .

Se considera que si la media de la distribución normal se encuentra muy alejada del origen, y la varianza no es muy grande, es aceptable la utilización de este tipo de distribución. En el Gráfico 2.4, se muestra la función de distribución acumulada de la distribución normal.

Gráfico 2.4 Función de Distribución Acumulada de la distribución Normal.



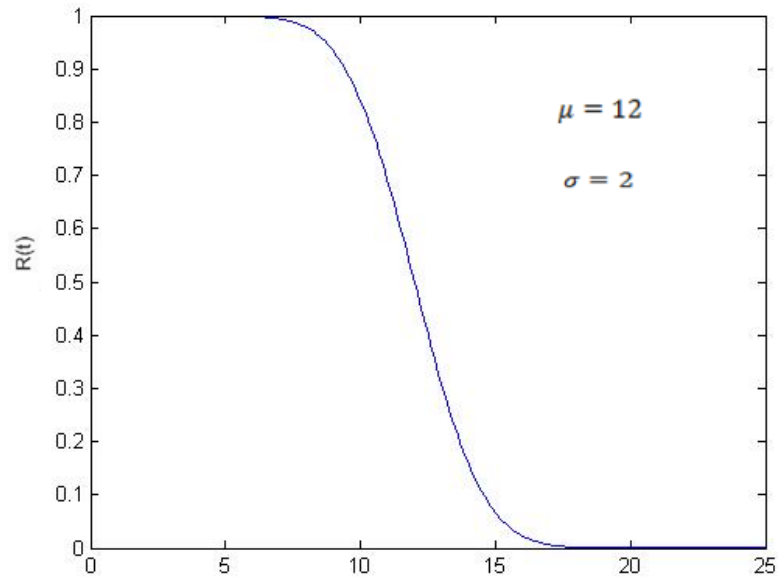
Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

La función de confiabilidad para este tipo de distribución se representa en la Ecuación 2.8 y en el Gráfico 2.5, se muestra su comportamiento.

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$$

Ecuación 2.8

Gráfico 2.5 Función de confiabilidad de La distribución normal.



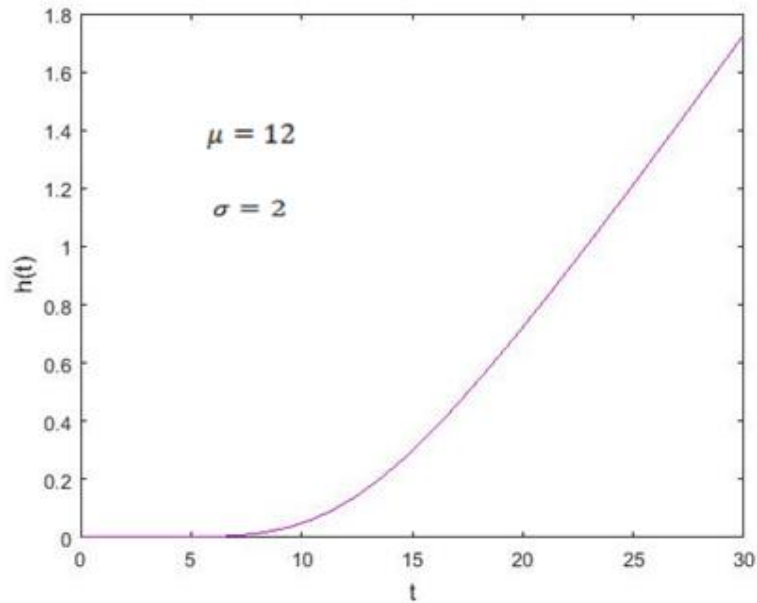
Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

La función de la tasa de riesgo para este tipo de distribución se representa en la Ecuación 2.9 Y en el Gráfico 2.6, se muestra su comportamiento.

$$h(t) = \frac{e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt}$$

Ecuación 2.9

Gráfico 2.6 Función de la tasa de riesgo de la Distribución normal.



Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

2.3 Tipos de Mantenimiento

Cuando se habla de mantenimiento, este se puede caracterizar dependiendo del tipo de estrategia que esté utilizando, con base en esto se pueden mencionar tres tipos de mantenimiento: El mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo, y mantenimiento basado en la condición.

2.3.1 Mantenimiento Correctivo

Este se define como un mantenimiento, cuya función es restaurar el estado operacional de un componente o equipo, este tipo de mantenimiento no realiza un planeamiento previo, y se realiza hasta que el equipo falla. (Rodríguez, Miguel, & Sánchez, 2001)

Al realizarse la reparación de un equipo o componente hasta llegar a su estado de falla, se tiene que el mantenimiento correctivo no es una estrategia eficiente de mantenimiento, ya que al no haber una planificación del control de la avería, generalmente, se puede aumentar el tiempo que se tarda en resolver la falla, así mismo al dejar que el sistema falle totalmente, puede provocar daños a otros equipos o componentes asociados, accidentes laborales, contaminación al ambiente o incluso pérdidas humanas.

En la industria eólica este tipo de mantenimiento no es conveniente, ya que si se trabaja con esta estrategia de mantenimiento, y se trabaja el equipo hasta llegar a fallar sin ningún monitoreo de éste, no se podrá planificar la adquisición de repuestos, lo que puede traducirse en mayor tiempo de paro. Esto no es conveniente, ya que generalmente las fallas pueden relacionarse con una mayor carga del sistema, ósea mayores vientos, y en la industria eólica, mayores vientos implica mayor generación, por lo que es indispensable que las unidades aerogeneradores se encuentren funcionando en estos periodos. (Bogantes, 2016)

2.3.2 Mantenimiento Preventivo

Realiza inspecciones periódicas a los componente o sistemas, realización de limpieza, lubricación, ajustes, comprobación y remplazo de componentes que pudieran fallar antes de la próxima inspección. (Rodríguez, Miguel, & Sánchez, 2001)

Este es un tipo de mantenimiento programado, el cual se basa en rutinas de mantenimiento que se realizan periódicamente. Facilita la adquisición de repuestos, y disminuye el tiempo de intervención de la máquina o componente.

Pretende disminuir las fallas (evitar el mantenimiento correctivo), para ello, es necesario acceder al sitio periódicamente, por lo que se le asocian altos costos por el traslado al sitio.

El mantenimiento preventivo tiene muchas ventajas, como la facilidad de aspectos de logística y la disminución de la probabilidad de la ocurrencia de fallas. Sin embargo, tiene la desventaja que al no contemplar la condición actual del componente o equipo, se puede incurrir en un sobre mantenimiento, además que al tener que trasladarse constantemente al sitio, los gastos de mantenimiento son mayores.

2.3.3 Mantenimiento Basado en la condición

El mantenimiento basado en la condición, busca maximizar la confiabilidad de los equipos, optimizar las labores de mantenimiento y mejorar las practicas que se aplican para la operación y mantenimiento del equipo. Este tipo de mantenimiento se considera un mantenimiento proactivo, y tiene como objetivo anticipar eventos de falla, lo que le permite una programación oportuna de las labores de intervención. (GTS CONFIABILIDAD, 2016)

Este tipo de mantenimiento si se aplica correctamente puede mejorar significativamente, la confiabilidad de los equipos, a la vez que se reducen los costos por mantenimiento. Lo ideal es realizar un monitoreo en línea de las variables que afectan un sistema o componente, y dependiendo de los valores que estas, determinar la acción de mantenimiento necesaria.

Con esto se puede reducir costos de mantenimiento, fallas inesperadas y recurrentes, reducción del inventario de repuestos, y se disminuyen los costos asociados al traslado en sitio de las cuadrillas de mantenimiento.

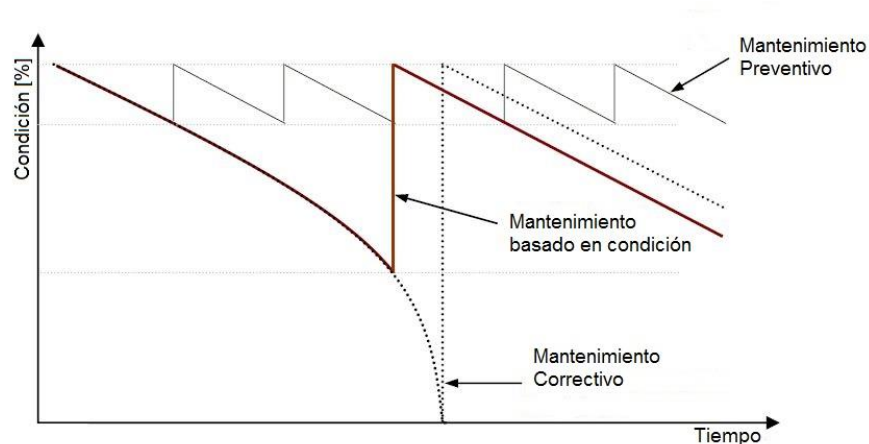


Figura 2.2 Variación del estado de un componente en f función del tiempo según la estrategia de mantenimiento utilizada.

Fuente: Ribrant (2006)

Desde el punto de vista de costos y confiabilidad de los equipos, la estrategia de mantenimiento más confiable es el mantenimiento basado en la condición, ya que al aplicarse correctamente proporciona una confiabilidad óptima a un costo relativamente bajo en comparación con las otras dos estrategias de mantenimiento.

2.4 Mantenimiento Selectivo

Al contar con varios equipos o componentes, los cuales a su vez poseen diferentes opciones de mantenimiento, resulta más crítico tomar las decisiones en cuanto a la elección de los componentes a los que se les debe realizar el mantenimiento, y que opción de mantenimiento aplicar a este. (Loria, 2016)

Se dice que el concepto de mantenimiento selectivo, se centra en la elección de las tareas de mantenimiento que se deben realizar, para que el equipo logre funcionar correctamente. (Pandey, Patel, Liang, Tian, & Zuo, 2011)

Para poder aplicar un correcto mantenimiento selectivo, es necesario conocer cómo se degrada cada componente, y el impacto que tendrían las respectivas acciones de mantenimiento sobre esto. Este es un aspecto de importancia, ya que de esto dependerán las diferentes acciones que se deban tomar, y la elección de los componentes a los que se les debe dar prioridad.

Para conocer la degradación de los componentes, es necesario contar con algún método que facilite este resultado, es ahí donde las redes neuronales artificiales ayudan a obtener estos resultados, para poder tomar las decisiones y acciones acertadas. Para una mayor comprensión, seguidamente se describe el modelo de las redes neuronales.

2.5 Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA), se basan en el funcionamiento de las neuronas biológicas, a través de algoritmos matemáticos que recrean el funcionamiento de estas. (Martínez & Álvarez, 2015)

La primera red neuronal se propuso en 1943 por McCulloch y Pitts, como un modelo de “actividad nerviosa”, el cual en un modelo binario formado por un conjunto de unidades (neuronas), conectadas entre sí, y en el que cada neurona tiene un umbral preestablecido. Las conexiones propuestas, tienen semejanza con las dendritas y axones presentes en las redes neuronales biológicas. (Arano, 2014)

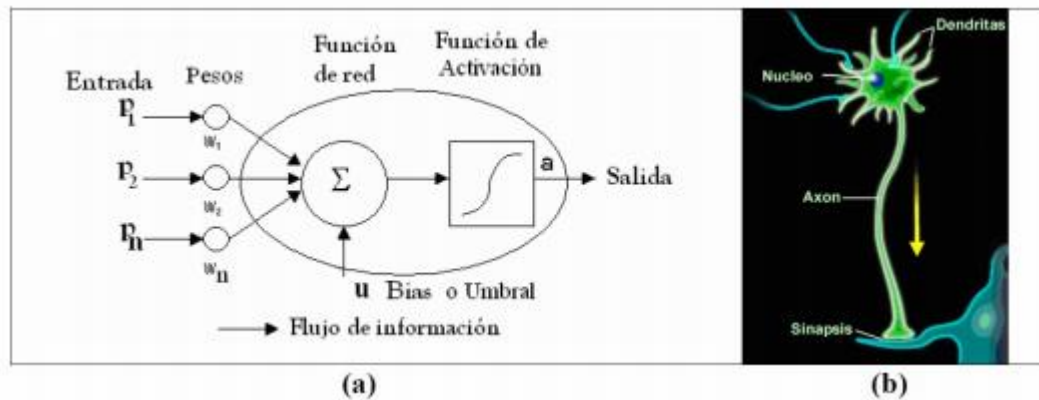


Figura 2.3 (a) Red neuronal. (b) Representación biológica de una neurona.

Fuente: (Arano, 2014)

Las partes que componen una neurona artificial básica son las siguientes:

1. Entrada: Son los datos más representativos del sistema al que se le aplica la ANN, es el vector que excita a la neurona.
2. Pesos: La variación de estos determina el aprendizaje que tenga la red, estos valores se relacionan a cada una de las conexiones entre las neuronas de la red.
3. Función de activación: Calcula el estado de activación de la neurona en función de la entrada total. Es la que mejor define el comportamiento de la neurona.
4. Función de red o propagación: Equivale a la combinación de las señales que excitan o inhiben a las neuronas biológicas.
5. Salida: Corresponde a la salida de la neurona en función de la activación de ella misma, lo que equivale al diagnóstico de la red.

En cada neurona, se lleva a cabo una función de propagación, la cual consiste en la suma ponderada de las entradas (x_i), por el peso de la conexión (w_{ij}), como se puede observar en la Ecuación 2.10.

$$f = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij}$$

Ecuación 2.10

Dependiendo de la estructura de la red, la salida de la neurona, puede ser la entrada a otra, y la cual corresponderá a un único valor.

Otro elemento que condiciona la salida de la neurona, es la función de activación, esta se encarga de evaluar si la salida se activa o no. Para el desarrollo de este proyecto se utilizará la función de activación sigmoideal, ya que esta es muy utilizada cuando se tienen valores análogos como en el caso de las señales para la elaboración de la red neuronal para el sistema hidráulico del aerogenerador G52/850.

2.5.1 Función de Activación Sigmoideal

Este tipo de función, toma los valores de entrada, los cuales pueden encontrarse entre más y menos infinito, y restringe la salida a valores entre cero y uno, utiliza la siguiente expresión:

$$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$$

Ecuación 2.11

Es muy utilizada cuando se tienen redes con estructuras multicapa, ya que la función sigmoideal es diferenciable.

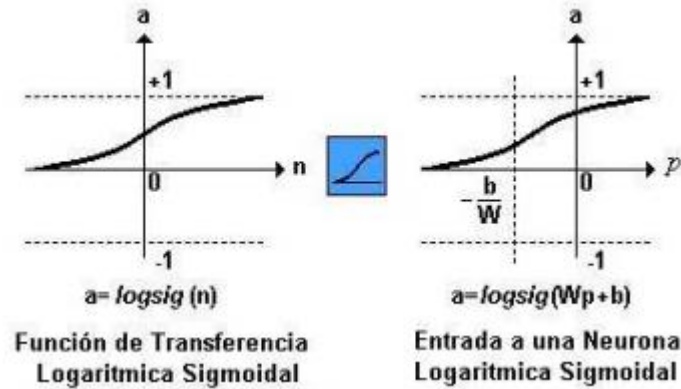


Figura 2.4 Función de Activación sigmoidal

2.5.2 Función de red o propagación

La entrada (p), es transmitida a través de la función lineal a través de una conexión, la cual se multiplica por su peso correspondiente (w), seguidamente, a este producto se le añade otro elemento denominado umbral (u), todo esto corresponde al argumento de la función de activación, la cual tiene como salida el escalar a .

$$a = f\left(\sum_{j=1}^n w_j p_j + u\right)$$

Ecuación 2.12

Dónde j es cada uno de los componentes del vector de entrada.

2.5.3 Fase de Aprendizaje y Fase de Prueba

La eficacia de la predicción de una red neuronal artificial, depende en gran medida de la fase de aprendizaje de la misma, y de la validación por medio de la fase de prueba. Para esto se debe destinar una porción de los datos para el aprendizaje de la red y otro para el período de prueba.

Las redes Neuronales se basan en ejemplos, y con la fase de aprendizaje se da una adaptación progresiva de los valores a lo interno de la red, para obtener el comportamiento deseado. Así mismo, la capacidad que tendrá la red para resolver un problema, estará ligado al tipo de datos disponible para el proceso de aprendizaje, los cuales se utilizan para modificar el valor de los pesos de las conexiones, hasta lograr un margen de error aceptable en la salida de la red. (Arano, 2014)

Tomando en referencia el error cuadrático medio (MSE), el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n_c} (s_j(n) - y_i(n))^2 \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Donde:

n : Número de datos de entrenamiento

n_c : Número de neuronas de la capa de salida

y_i : Predicción de la i -ésima neurona de la capa de salida

s_j : Es el valor objetivo de la i -ésima neurona de la capa de salida.

Según el algoritmo seleccionado, así será la modificación de los pesos, para realizar la modificación, se realiza una variación en la matriz de los pesos y umbrales, reajustando dichos valores de acuerdo al error que se produzca en las neuronas de salida.

$$W(n + 1) = W(n) + \Delta W(n) \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde:

$W(n)$: Peso particular para el patrón de entrada n .

$W(n + 1)$ =: Peso particular de entrada $n+1$.

$\Delta W(n)$: Ajuste del valor del peso.

Al igual que se da la modificación de los pesos, se deben modificar los umbrales, lo cual se realiza mediante la Ecuación 2.15.

$$u(n + 1) = u(n) + \Delta u(n)$$

Ecuación 2.15

Donde:

$u(n)$: Valor del Umbral particular para el patrón de entrada n .

$u(n + 1)$ =: Valor del Umbral particular de entrada $n+1$.

$\Delta u(n)$: Ajuste del Umbral del peso.

CAPÍTULO 3: Turbinas Eólicas

En el presente capítulo se realizará una breve descripción del funcionamiento de las turbinas eólicas, así de sus sistemas principales, tendencias de falla y sus componentes críticos.



Figura 3.1 Aerogeneradores de eje horizontal y tres palas, Parque Eólico Los Santos

Fuente: COOPESANTOS (2011)

Un aerogenerador, es un dispositivo que se encarga de transformar la energía cinética del viento, en energía mecánica, la cual a su vez será transformada en energía eléctrica a través de un generador.

Generalmente constan de un rotor, con palas o aspas que giran alrededor de un eje horizontal, lo que a su vez se encuentra unido a un conjunto de transmisión mecánica y finalmente a un generador eléctrico. (Gamesa, 2010)

Los aerogeneradores modernos funcionan bajo el principio de sustentación, de manera similar al ala de un avión, este avance en el diseño aerodinámico y estructural de las palas, ha permitido lograr una mayor eficiencia en la conversión de energía. (Parque Eólico Experimental SOTAVENTO, 2017)

3.1 Sistemas principales de un Aerogenerador



Figura 3.2 Componentes de un aerogenerador.

Fuente: Ifm, (2016)

Seguidamente, se presentan los sistemas principales de un aerogenerador:

3.1.1 Sistema de Captación

Se compone de los siguientes elementos:

3.1.1.1 Rotor

Es el corazón de la turbina eólica, constituye todos los elementos que giran por delante y fuera de la góndola (alabes y buje), se encarga de transformar la energía del viento en energía mecánica.

3.1.1.2 Palas

Se función es capturar la energía del viento, y transmitir su potencia al buje. Estas pueden ser de dos tipos, de paso fijo y de paso variable. (Parque Eólico Experimental SOTAVENTO, 2017)

- **Paso fijo:** Mantienen su posición invariable, cuando la velocidad del viento excede un determinado valor, provocan turbulencias en el perfil del ala para provocar pérdidas aerodinámicas que mantienen dentro de los márgenes la energía extraída.
- **Paso Variable:** Permite controlar la energía mecánica suministrada al aerogenerador modificando la posición del ángulo que forma el perfil de la pala con la corriente de aire incidente en la misma.

3.1.1.3 Buje

Se encuentra acoplado al eje de baja velocidad, su función es unir las palas al eje lento.

3.1.2 Sistema de Transmisión

Se compone de los siguientes elementos:

3.1.2.1 Eje lento

Es un eje el cual gira a la misma velocidad que las palas, conecta el eje buje del rotor al multiplicador.

3.1.2.2 Multiplicador

Mediante un sistema de engranajes, se encarga de multiplicar la velocidad de giro en el eje de salida, generalmente entre 80 y 50 veces más rápido. (Parque Eólico Experimental SOTAVENTO, 2017)

3.1.2.3 Eje de Alta velocidad

Gira a una velocidad que permite el funcionamiento del generador, aproximadamente, 1500 rpm, se encuentra equipada con un freno de disco mecánico de emergencia.

3.1.3 Sistema de orientación

Se compone de los siguientes elementos:



Figura 3.3 Mecanismo de Orientación

Fuente: Ifm, (2016)

3.1.3.1 Motores de giro

Para el correcto funcionamiento del aerogenerador, este debe estar posicionado con respecto a la dirección del viento, para esto los aerogeneradores, están provistos de unos motores y reductores fijos a la góndola que engranan en un dentado de la parte superior de la torre (corona de orientación), esta acción la realizan respecto a la lectura de las señales de orientación y velocidad de la veleta y el anemómetro. (Parque Eólico Experimental SOTAVENTO, 2017)

3.1.3.2 Freno en Orientación

Su función es evitar desplazamientos radiales no deseados de la góndola, ya sea por efectos del viento incidente o por el giro del rotor. Además, reduce el desgaste de los engranes de orientación.

3.1.4 Sistema de Generación

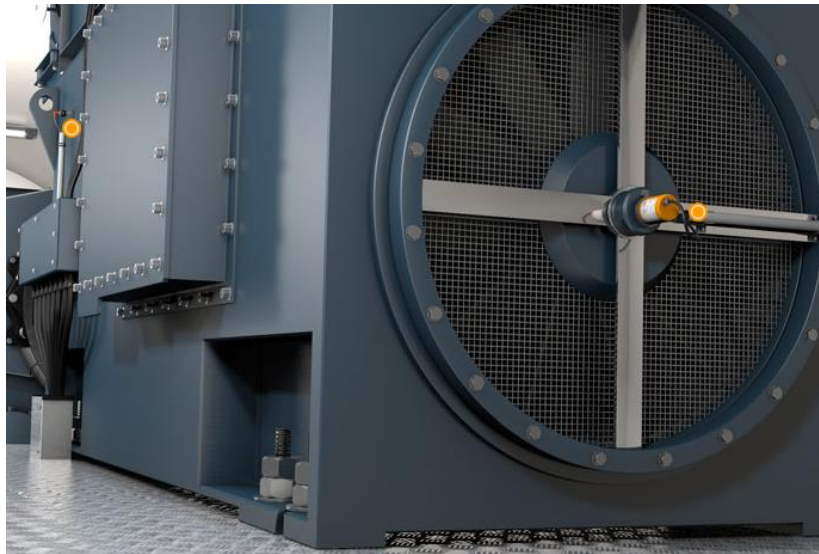


Figura 3.4 Generador

Fuente: Ifm, (2016)

3.1.4.1 Generador Eléctrico

Se encarga de convertir la energía mecánica en energía eléctrica, la corriente generada, se envía a la base de la torre donde se le eleva su tensión para ser enviada a la sub estación.

3.1.4.2 Cableado de Potencia

Es el medio por el que se transmite la energía generada en el alternador, hasta la base el transformador ubicado en la base de la torre, debe pasar por los distintas protecciones de máxima o mínima tensión, sobre intensidad o frecuencia, con el fin de evitar daños en la red o en el aerogenerador.

3.1.4.3 Transformador

Se encarga de elevar la tensión producida por el generador, para reducir las pérdidas eléctricas y el calentamiento del cableado.

3.1.5 Sistema de Control

Se compone de señales de control y regulación de la turbina, las cuales supervisan las condiciones del aerogenerador, y se encarga de la regulación de interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y demás elementos del aerogenerador.

3.1.6 Sistemas de Soporte

3.1.6.1 Torre

Se encarga de soportar todo el peso de la góndola y el rotor. Se componen de varias secciones, las cuales se unen mediante pernos en las bridas de unión.

3.1.6.2 Cimentación

Es una parte muy importante de las turbinas eólicas, ya que se encarga de mantener la verticalidad de la estructura, absorbe las tensiones de toda la estructura y la transmite al terreno.

3.1.7 Sistema de Refrigeración

Se compone de los siguientes elementos:

3.1.7.1 Ventiladores

Funcionan a requerimiento del controlador para crear una circulación de aire.

3.1.7.2 Intercambiadores de Calor

Disipan el calor del componente a refrigerar (generador, multiplicador o central hidráulica) hacia la corriente de aire creada por los ventiladores.

3.1.8 Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico se encarga de abastecer de energía o potencia hidráulica el sistema de cambio de paso de las palas, el freno del eje de alta velocidad y las mordazas del freno del sistema de giro. (Gamesa, 2007)

El sistema hidráulico desempeña funciones muy importantes dentro del funcionamiento de las turbinas eólicas, ya que se encargan de controlar el ángulo de las palas durante su funcionamiento normal, y lleva las palas a la posición de seguridad en caso de fallo eléctrico o falta de presión, y en aerogeneradores que no cuentan con freno eléctrico, el sistema hidráulico activa el freno de disco del eje rápido. (Rodríguez & Simón, 2014)

Debido a que el presente proyecto se basa en el desarrollo de una red neuronal artificial para la predicción de vida útil acumulada del sistema hidráulico, se procederá a describir este más detalladamente.

3.2 Sistema hidráulico de los aerogeneradores

Este sistema consiste en una unidad de potencia, la cual se localiza en el lado derecho de la góndola, y la red de distribución hidráulica, la cual suministra la potencia hidráulica al cilindro del pitch, al freno de emergencia, y al sistema de frenado del sistema de giro. (Gamesa, 2007)

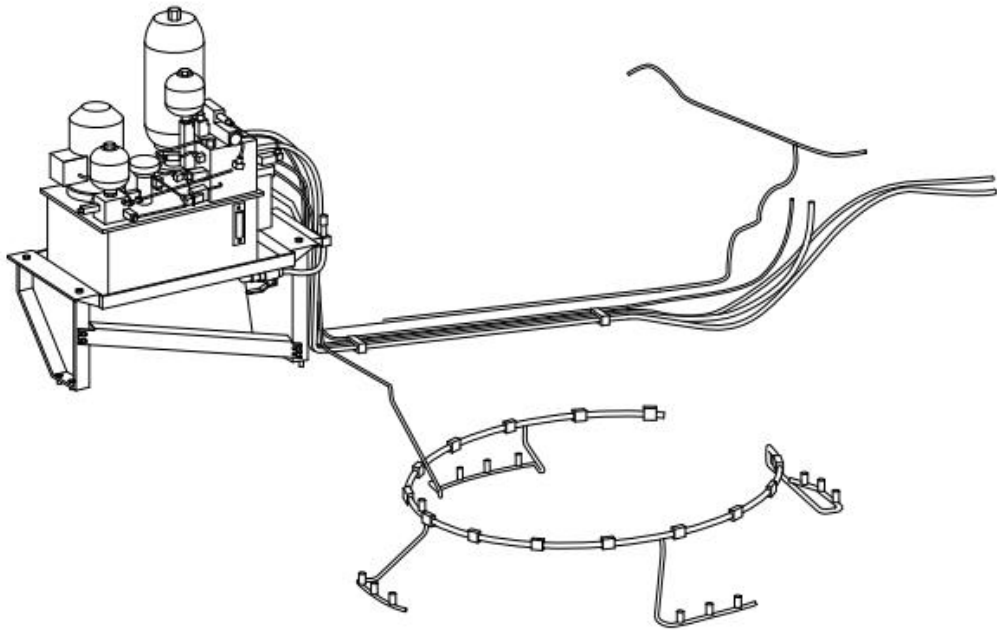


Figura 3.5 Vista General y localización en el generador del Grupo hidráulico

Fuente: (Gamesa, 2007)

El sistema hidráulico puede sub dividirse en los siguientes sistemas:

1. Grupo hidráulico principal
2. Sistema de refrigeración
3. Sistema de freno mecánico
4. Sistema de freno del sistema de giro
5. Sistema de cambio de paso.

3.2.1 Grupo hidráulico Carga del acumulador

Consta de un depósito de aluminio de aproximadamente 80 l de capacidad, una sonda de nivel, la cual cuenta con contactares eléctricos los cuales se encargan de dar la señal de nivel bajo cuando la boya desciende con el aceite del depósito. Además, cuenta con un filtro de aire con un elemento filtrante de 3 μm absolutas, una sonda de temperatura, la cual varía la señal de salida en función de la temperatura del aceite, y una serie de válvulas y reguladores.

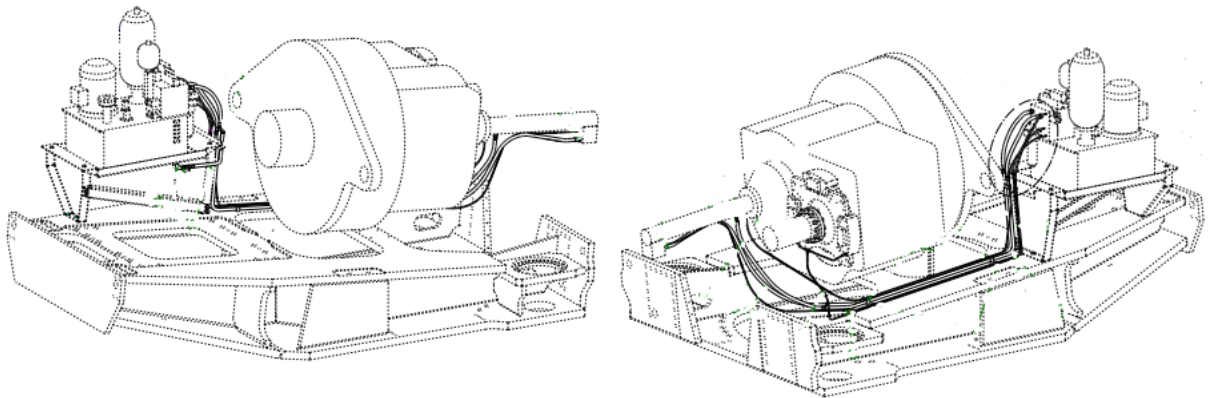


Figura 3.6 Sistema Hidráulico Aerogeneradores Gamesa

Adaptado de: (Gamesa, 2007)

El funcionamiento del grupo hidráulico principal es el siguiente: El motor hace girar la bomba y el aceite pasa a través de la válvula de retención hasta el filtro, este filtro se encuentra unido al bloque de regulación, tiene incorporado un by-pass e indicador eléctrico de suavidad. Cuyo indicador de suavidad se activa con un diferencial de presión de 5 bar y la válvula by-pass abre con una presión diferencial de 7 bar. El aceite fluye hasta el acumulador cargado de nitrógeno, comprimiendo la vejiga del acumulador hasta alcanzar una presión de 200 bar, en este momento, el transductor envía orden de para el motor. Cuando el transductor detecta que la presión del sistema baja a 180 bar., envía una señal para que el motor vuelva a arrancar. (Gamesa, 2007)

Como seguridad de este sistema, se encuentra una en derivación una válvula limitadora de presión calibrada a 220 bar.

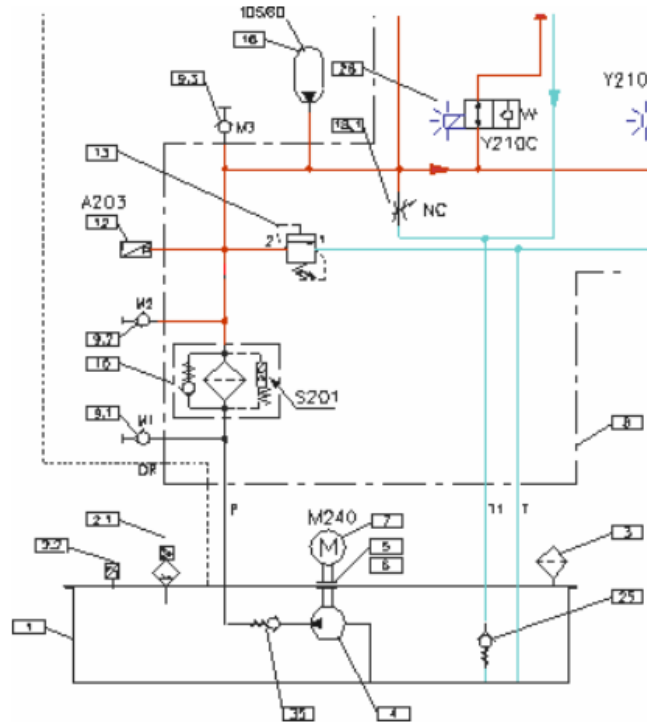


Figura 3.7 Circuito Hidráulico que interviene en la carga de los acumuladores

Fuente: (Gamesa, 2007)

3.2.2 Circuito de Freno

Esta parte de este circuito inicia en la válvula reductora, la cual se encarga de reducir la presión de la línea general al valor correspondiente para la función de este circuito, posteriormente, el aceite atravesará la válvula anti-retorno, cargando el acumulador, el cual estaba previamente cargado con nitrógeno. El presostato detecta la presión del acumulador de freno cargado. Una electroválvula se encargará de activar o desactivar los frenos, mientras la máquina se encuentre en marcha, la electroválvula estará excitado, inhabilitando los frenos. (Gamesa, 2007)

3.2.3 Circuito de Freno de Yaw

La derivación del circuito principal entra al bloque de válvulas del circuito de freno del Yaw, mientras carga el acumulador, el aceite alimenta las cuatro mordazas activas a través de la electroválvula, produciéndose así el freno de la corona de orientación. Al aplicarse el freno, una segunda electroválvula cambia de posición y a través de la válvula reductora se mantiene una presión actuando sobre las pinzas. El excedente de aceite va al tanque, y si la presión cae por debajo de la presión mínima, el circuito principal se encarga de suministrar el aceite suficiente para producir la compensación.

3.2.4 Elementos Funcionales

El circuito hidráulico puede actuar en los siguientes modos de funcionamiento:

- a. Saliendo Cilindro en Regulación
- b. Entrando Cilindro
- c. Emergencia / Stop

3.2.4.1 Saliendo Cilindro en Regulación

Partiendo de la condición de marcha. Se da el acceso del aceite hacia la válvula proporcional, se cierra el paso del conducto de emergencia hacia el cilindro de pitch, se cierra lógico y se pilotea la retención de cilindro y válvula anti retorno para dejarlas abiertas. Se anula la presión en las pinzas de freno, dejando el freno desaplicado. Al excitar la bobina de la válvula proporcional, comienza a fluir aceite introduciéndose en la cámara grande del cilindro a través de la válvula de retención pilotada. Al desplazarse el pistón del cilindro hacia adelante, provoca la salida de la cámara anular, pasando a través de la válvula anti retorno, ya que esta se mantiene cerrada. Finalmente, el aceite de la cámara anular se une con el que viene del acumulador repitiendo el mismo circuito. (Gamesa, 2007)

La válvula proporcional regulará la cantidad de aceite que fluya por el circuito, lo que a su vez controla la velocidad del mismo.

3.2.4.2 Entrando Cilindro

Al encontrarse en una posición de marcha, se excita la bobina de la válvula proporcional, paralelamente, comenzara a fluir el aceite pasando a través de la válvula anti retorno, manteniéndose cerrada la válvula anti retorno, entrando a la cámara anular del cilindro. Al entrar el aceite en la cámara anular desplaza el pistón del cilindro, obligando al aceite a pasar a través de las retenciones pilotadas hacia la válvula proporcional. Seguidamente, el aceite retorna al depósito a través de la válvula de retención que se sitúa en el interior del tanque. (Gamesa, 2007)

3.2.4.3 Emergencia / Stop

La válvula central, posicionada en posición central, permite que todo el circuito se encuentre cerrado, una electroválvula abre el paso hacia la válvula proporcional, mientras que otra electroválvula abre el paso directo por la vía de emergencia hacia el cilindro. Mientras tanto, una tercera electroválvula deja en posición de abierto el lógico y pone en descarga la línea de pilotaje de la válvula anti retorno pilotadas que hasta ahora se habían mantenido abiertas. El aceite que viene del acumulador, pasa a través de la válvula, subiendo directamente hasta la retención pilotada, la cual atraviesa por paso libre. La válvula anti retorno pilotada está cerrada La válvula proporcional proporciona redundancia (todo cerrado) ante un posible fallo de la válvula anti retorno mientras que la válvula de retención se mantiene cerrada. Al llenar la cámara grande del cilindro, desplazamos el aceite de la cámara anular del mismo que fluye a través del lógico ya que tanto las válvulas anti retorno están cerradas. De esta forma, el aceite sale a través del regulador fijo directamente a tanque. (Gamesa, 2007)

3.2.5 Componentes del sistema hidráulico

En la siguiente figura se muestra el diagrama unifilar de los componentes que integran el grupo hidráulico

Tabla 3.1, se muestra la descripción de cada uno.

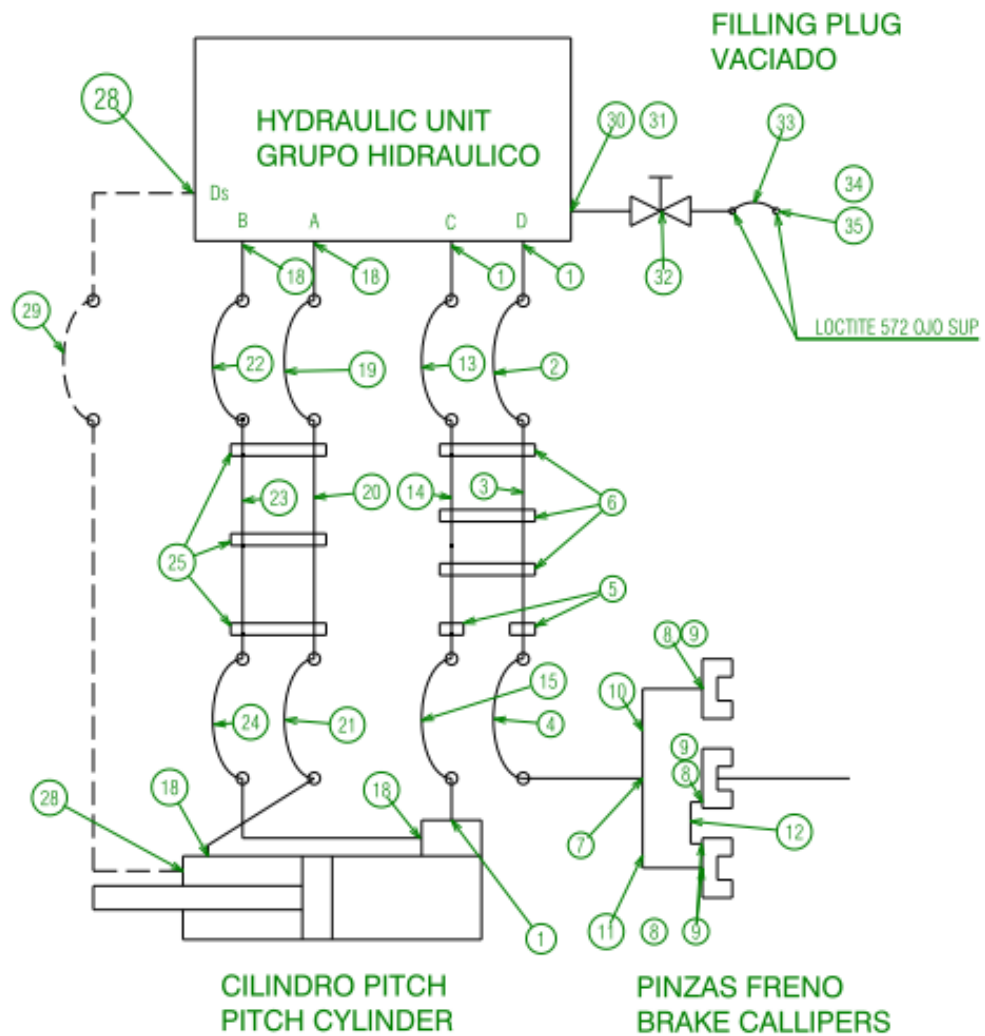


Figura 3.8 Diagrama Grupo hidráulico

Fuente: (Gamesa, 2007)

Tabla 3.1 Componentes del sistema Hidráulico

N°	Descripción
1	RACOR 5-42EDMXS
2	LATIGUILLO FRENO 1
3	TUBO DE FRENO
4	LATIGUILLO FRENO 2
5	ABRAZADERA SIMPLE TUBO 6 RAP14006
6	ABRAZADERA DOBLE TUBO 6 RBP14006
7	RACOR EN T 4JMTXS
8	CODO 4C6MXS
9	RACOR 4M10F82EDMXS
10	TUBO FRENO PASTILLA IZQUIERDA
11	TUBO FRENO PARTILLA DERECHA
12	TUBO FRENO PASTILLA CENTRAL
13	LATIGUILLO PILOTAJE 1
14	TUBO PILOTAJE
15	LATIGUILLO PILOTAJE 2
16	TAPÓN MANGUERA 5PNMTXS
17	RACOR 5FNDMTXS
18	RACOR 10F42EDMXS
19	LATIGUILLO CÁMARA CILINDRO DELANTERA 1
20	TUBO CÁMARA CILINDRO DELANTERA
21	LATIGUILLO CÁMARA CILINDRO DELANTERA 2
22	LATIGUILLO CÁMARA CILINDRO TRASERA 1
23	TUBO CÁMARA CILINDRO TRASERA
24	LATIGUILLO CÁMARA CILINDRO TRASERA 2
25	ABRAZADERA DOBLE TUBO 20 RBP14320
26	TAPÓN MANGUERA 10PNMTXS
27	TAPON RACOR 10FNMTXS
28	RACOR 391B2-4-4 B
29	MANGUERA DRENAJE CILINDRO
30	CODO ORIENTABLE WEE15LROMDAC3C
31	ADAPTADOR EGE15LREDA3C
32	LLAVE DE PASO 1/2 BVGTA-1/2L
33	LATIGUILLO VACIADO DEPOSITO GH
34	ENCHUFE RAPIDO MACHO NS502-BFB
35	ABRAZADERA SIMPLE TUBO 20 RAP14320

Fuente: (Gamesa, 2007)

3.3 Tendencia de Fallas de los componentes de un aerogenerador

La energía eólica, es una fuente de energía limpia, la cual ha venido en crecimiento a nivel mundial y nacional como se mencionó en la sección 1.4 (descripción del proyecto). Lo que evidencia que se está logrando un fuerte posicionamiento como una alternativa a los combustibles fósiles, y a lograr el 100% de la generación eléctrica nacional con energías renovables.

Como producto de este crecimiento en la industria eólica, es necesario el surgimiento de nuevas estrategias de mantenimiento que reduzcan los costos de operación y mantenimiento, los cuales representan más del 50% de los costos de explotación de los parques eólicos (Gráfico 1.1).

Para poder desarrollar nuevas estrategias de mantenimiento, más efectivas y que garanticen la confiabilidad de los equipos, es importante identificar las tendencias de fallas de los componentes que conforman el aerogenerador, ya que de estos depende la eficiencia y confiabilidad que el aerogenerador tenga.

Las fallas prematuras aumentan los costos de operación y mantenimiento, y en los parques eólicos esto se presentan con regularidad, es por esto que las nuevas estrategias de mantenimiento que se planteen deben estar enfocadas en disminuir los costos de mantenimiento, reduciendo el tiempo de paros de los aerogeneradores y garantizando la máxima confiabilidad de los mismos.

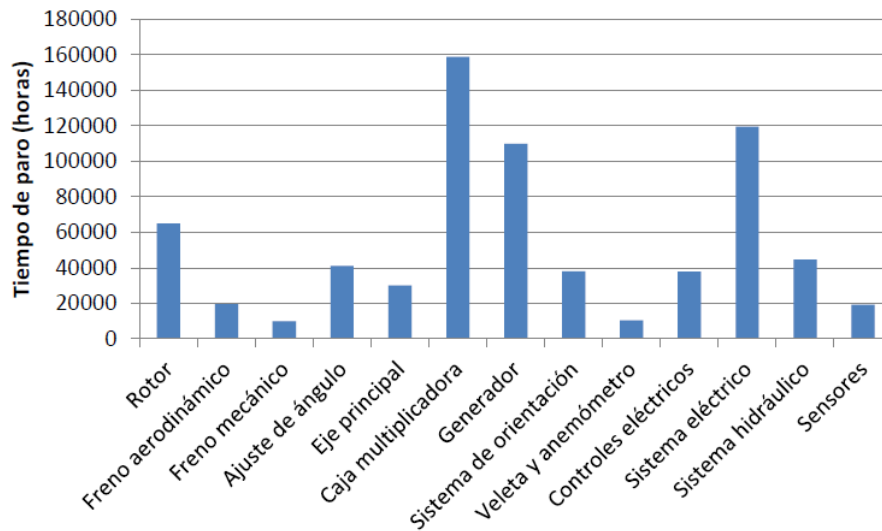
Seguidamente se muestran las tendencias de fallas presentes en algunos componentes de las turbinas expresados a través del tiempo de paro de cada uno de ellos. Esto se realizó por periodos significativos para establecer el comportamiento de cada componente y así poder visualizar su criticidad en el sistema.

Sheng y Veers (2011, p. 1) aseguran que la caja multiplicadora ha mostrado tener el tiempo de paro más largo y es el subsistema más costoso económicamente en términos de mantenimiento.

3.3.1 Reino Unido

En la siguiente gráfica, se presentan los datos recolectados entre 2003 y 2009, correspondientes a los mayores tiempos de paro por subsistemas en distintos parques eólicos del Reino Unido. Se observa que los mayores tiempos de paro corresponden a la caja multiplicadora, sistema eléctrico y el generador.

Gráfico 3.1 Tiempos de paro para subsistemas de turbinas eólicas en Reino Unido

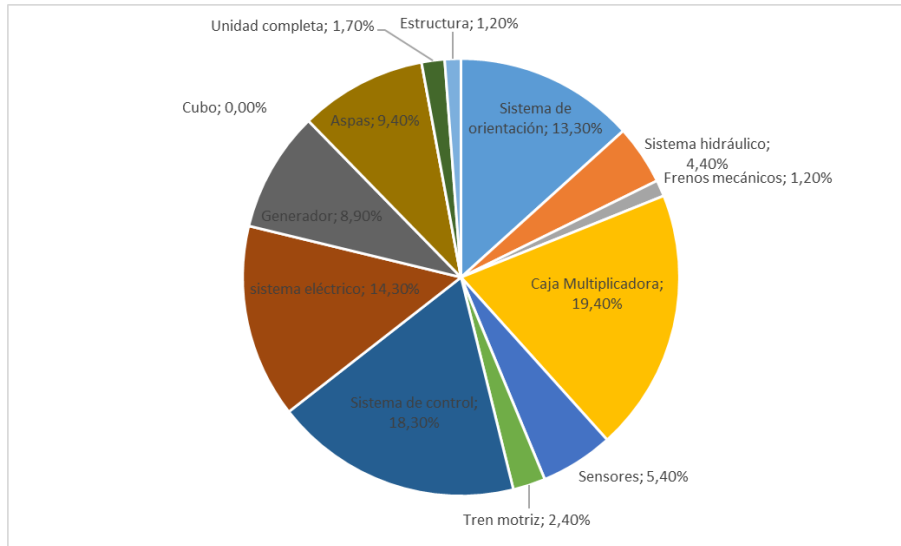


Fuente: Wind Stats Newsletter, 2003-2009, Reino Unido

3.3.2 Suecia

En la siguiente gráfica, se presentan los datos recolectados entre 2000 y 2004, correspondientes a los mayores tiempos de paro por subsistemas en distintos parques eólicos de Suecia. Se observa que los mayores tiempos de paro corresponden a la caja multiplicadora, sistema de control, y sistema eléctrico.

Gráfico 3.2 Tiempos de paro por componente de turbinas eólicas en Suecia

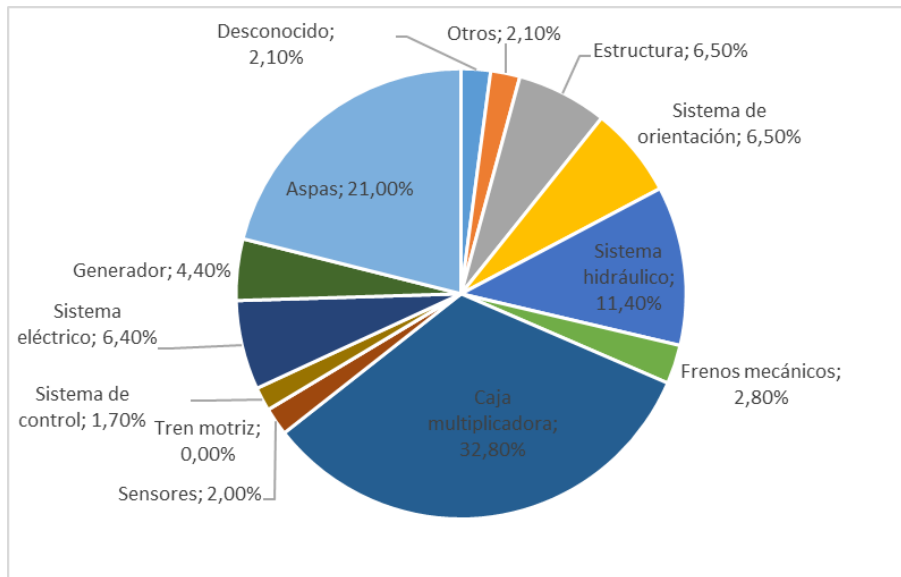


Fuente: Driftuppföljning av Årsrapport 2000-2004, Suecia

3.3.3 Finlandia

En la siguiente gráfica, se presentan los datos recolectados entre 2000 y 2004, correspondientes a los mayores tiempos de paro por subsistemas en distintos parques eólicos de Finlandia. Se observa que los mayores tiempos de paro corresponden a la caja multiplicadora, generador y el tren motriz.

Gráfico 3.3 Tiempos de paro por componente de turbinas eólicas en Finlandia

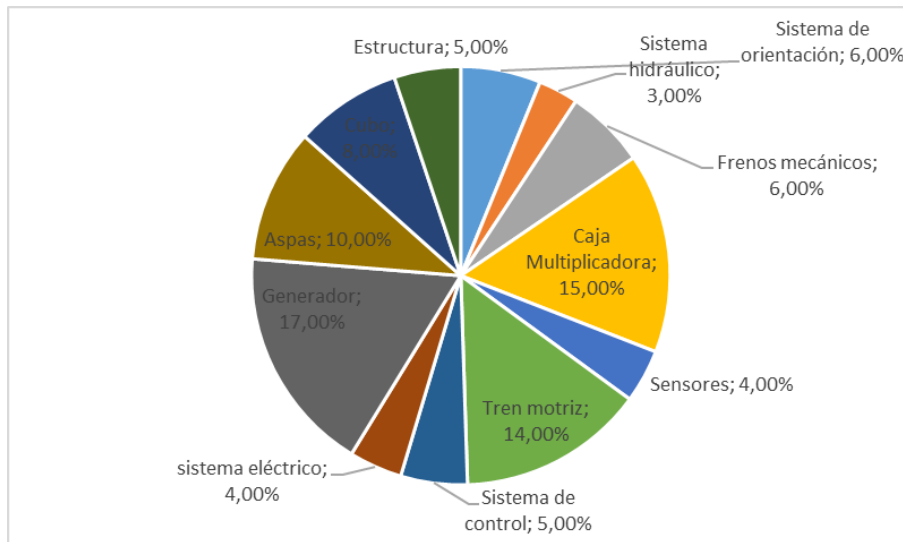


Fuente: Tuulivoiman Tuotantotilastot Vuosiraportti 2000-2004, Finlandia

3.3.4 Alemania

En la siguiente gráfica, se presentan los datos recolectados entre 2003 y 2005, correspondientes a los mayores tiempos de paro por subsistemas en distintos parques eólicos de Alemania. Se observa que los mayores tiempos de paro corresponden al, generador caja multiplicadora y el tren motriz.

Gráfico 3.4 Tiempos de paro por componente de turbinas eólicas en Alemania.



Fuente: WMWP 2003-2005, Alemania

CAPÍTULO 4: Modelo a Implementar

En el presente capítulo se describe el modelo propuesto por la Ing. Loria para el desarrollo de un modelo de toma de decisiones basado en el deterioro multi-estado de los aerogeneradores más representativos de Costa Rica.

Así mismo, se mencionan los puntos más importantes de la investigación realizada por el Ing. Bogantes, quien para optar por su título de Licenciatura determinó la estructura necesaria para implementar el modelo propuesto por Loria en los aerogeneradores del Parque Eólico Los Santos.

El desarrollo de este proyecto se basará en estas dos investigaciones, por lo que se recomienda la revisión de ambos documentos para tener una noción más clara de las bases que sustentan este trabajo.

Se aclara que con dicho modelo no se evitara la ocurrencia de falla, sino lo que se pretende es que a través de la predicción de ocurrencia de la falla, se reduzca el sobre mantenimiento, lo que se reflejaría en una reducción de los costos asociados al rubro de operación y mantenimiento en parques eólicos. (Loria, 2016)

4.1 Diseño de un modelo de toma de decisiones para mantenimiento basado en el monitoreo del deterioro multi-estado para un sistema de aero-generación instalado en Costa Rica

Este modelo plantea las bases necesarias para la eventual implementación del modelo de toma de decisiones en un Parque Eólico en Costa Rica, para el cual fue seleccionado el Parque Eólico Orosi, el cual inicio operaciones en setiembre del 2015, cuenta con 25 unidades aero-generadoras Gamesa G87/2000.

En este modelo son desarrollados temas como la representación del sistema, datos iniciales necesarios, construcción de las redes neuronales artificiales, el método de simulación para evaluar el costo, así como la instrumentación requerida para aplicar el modelo. A continuación, se presentan las secciones de datos iniciales necesarios y construcción de las redes neuronales.

4.1.1 Datos Iniciales

Se debe tener claro lo siguiente:

1. Existen estados intermedios de condición, por lo que se tiene un sistema Multi-estado.
2. El proceso de degradación de una turbina no afecta el proceso de degradación de otros componentes ni el de las turbinas restantes.

Los datos iniciales para realizar la implementación del modelo de toma de decisiones de mantenimiento basado en el deterioro multi-estado en cada componente son los historiales de falla y suspensión, los parámetros de la distribución Weibull del tiempo de vida y los costos fijos y variables de mantenimiento. (Loria, 2016)

Se recomienda iniciar con un historial mínimo de un año de las mediciones, para poder realizar el entrenamiento y prueba de la red neuronal, ya que un correcto entrenamiento de la red mejora la predicción de la vida útil de los componentes. Además, se recomienda que se continúe con la recolección de datos de falla y suspensión, para así poder con mayor exactitud el comportamiento de los componentes y las tendencias del proceso de falla de los aerogeneradores.

Así mismo, es necesario contar con los costos de mantenimiento, incluyendo costos variables por remplazo correctivo y preventivo de cada componente, costos fijos y el asociado por envío del personal al proyecto eólico. De igual manera, esta información debe actualizarse periódicamente, para no introducir error en el proceso de optimización y poder garantizar el mínimo costo de mantenimiento.

4.1.2 Construcción de las Redes Neuronales Artificiales

Con el fin de evidenciar como el deterioro es un índice del envejecimiento de los componentes, las redes neuronales propuestas por Tian Jim, Wu & Ding (2010) proponen una estructura específica, que es en la que se basa el modelo planteado por Loria, Tian (2010), plantea que la cantidad de nodos será la cantidad de mediciones predictivas por dos, más dos nodos (2+2I).

La edad de los componentes se contabiliza desde el momento en que estos son puestos en funcionamiento, y continúa contabilizándose aun cuando reciben mantenimiento, solamente se reinicia el conteo, cuando el componente es reemplazado.

Seguidamente se muestran la topología de las redes neuronales propuestas por Loria, las cuales son propuestas para el generador, el rotor, rodamiento principal, y la caja multiplicadora.

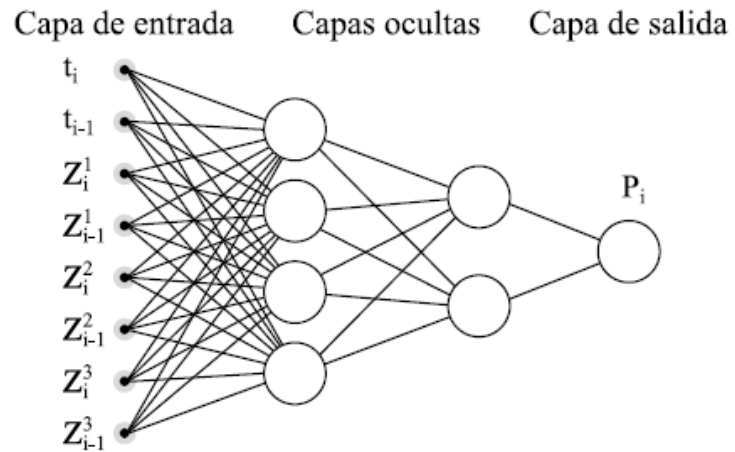


Figura 4.1 ANN para el rotor y el rodamiento principal

Fuente: Loria (2016)

Se debe mencionar, que aunque el rotor y el rodamiento principal tengan la misma estructura, tanto el proceso de entrenamiento y validación será distinta para cada componente.

En la Figura 4.1, t representa la edad calendario, z_1 a la aceleración en la dirección axial, z_2 en el plano horizontal y z_3 en el plano vertical. Siendo todas las entradas de los puntos de inspección actual y el punto anterior.

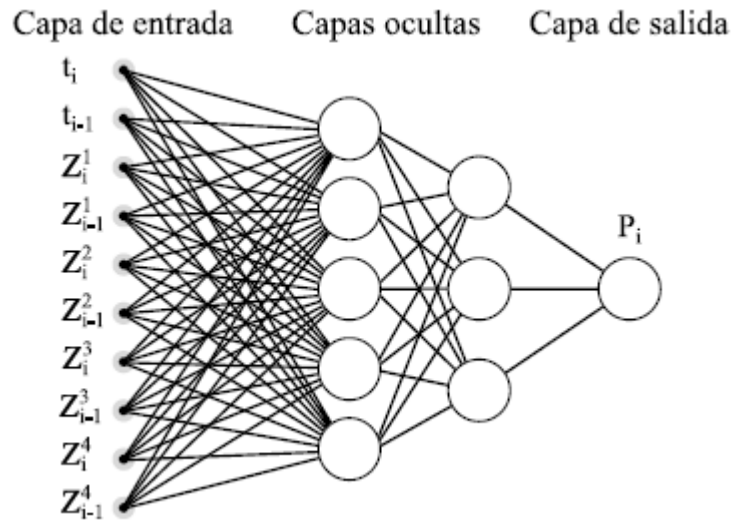


Figura 4.2 ANN para la caja multiplicadora

Fuente: Loria (2016)

En la Figura 4.2, se muestra la red neuronal propuesta por Loria para la caja multiplicadora, donde t corresponde a la edad calendario, z_1 , z_2 , z_3 a las aceleraciones en las direcciones axial, horizontal y vertical respectivamente y z_4 , a la medición de monitoreo de aceite.

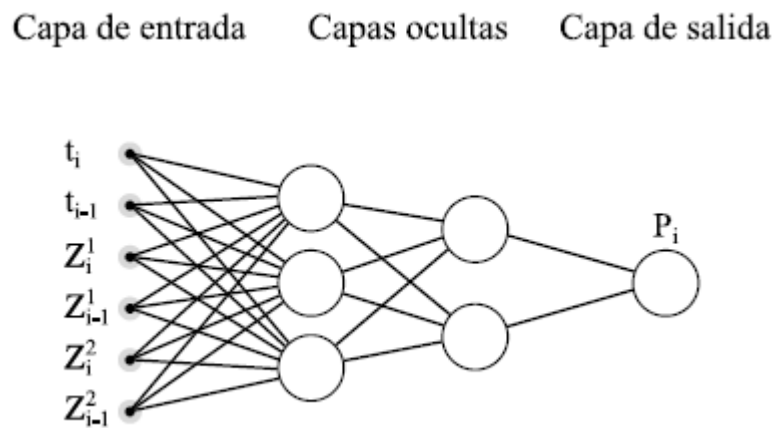


Figura 4.3 ANN para el generador eléctrico

Fuente: Loria (2016)

En la Figura 4.3, se muestra la red neuronal propuesta por Loria para el generador eléctrico, donde t corresponde a la edad calendario, z_1 hace referencia a la medición de voltaje, y z_2 a la medición de temperatura.

Para las tres ANN anteriores, la unidad de salida corresponde al porcentaje de vida del componente, el cual tendrá asociado un error con respecto a la diferencia entre el valor esperado y el valor que se obtendrá de la ANN. Para esto se asume que este error sigue la distribución normal, con sus respectivos parámetros.

4.2 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

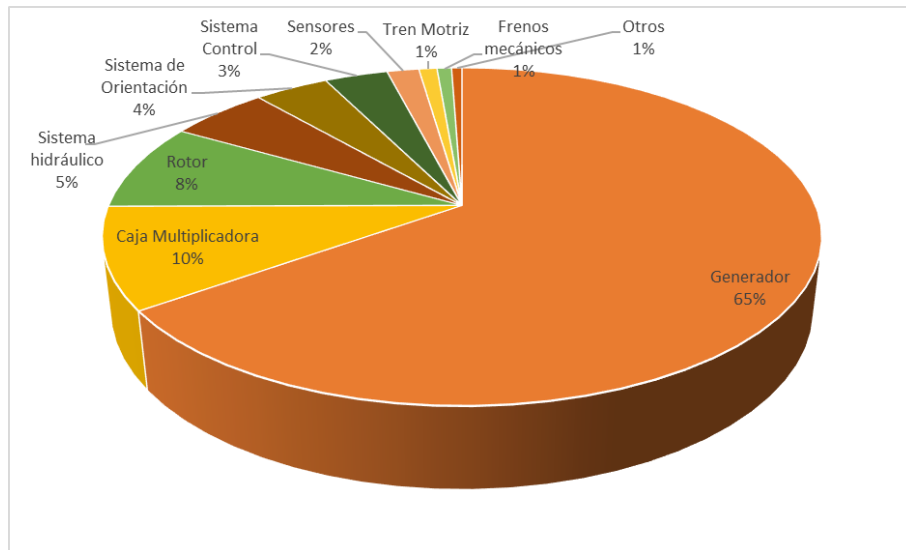
Bogantes, realizó una investigación en el Parque Eólico Los Santos, para determinar la estructura necesaria para poder implementar el modelo propuesto por Loria en dicho parque.

Para poder determinar dicha estructura, Bogantes desarrollo temas como la determinación de los componentes críticos, las variables de condición que se deben monitorear, y finalmente, realiza una nueva propuesta de la estructura de las ANN para los componentes críticos identificados.

4.2.1 Componentes Críticos

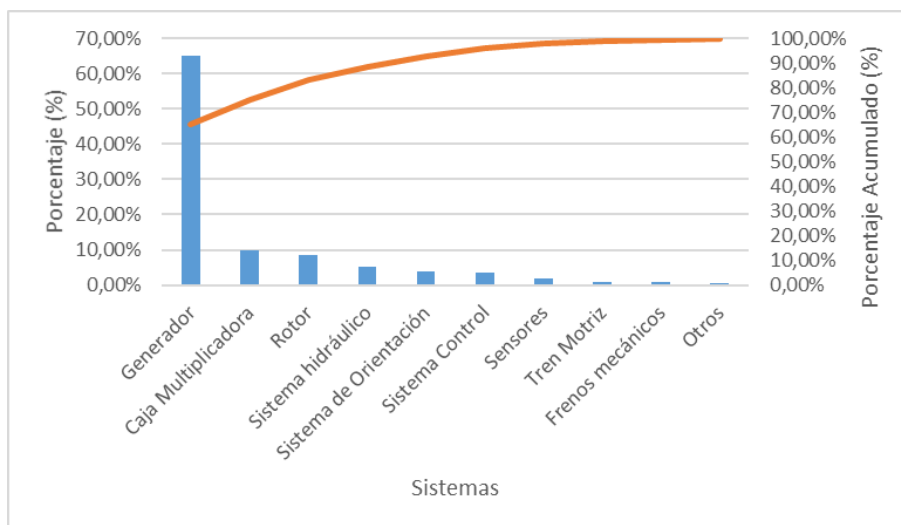
Para la determinación de los componentes críticos, Bogantes utilizó los historiales de mantenimiento y órdenes de trabajo, así como los costos asociados a estos para poder establecer cuales componentes provocarían un mayor impacto, tanto en costo como en horas de falla.

Gráfico 4.1 Costos de mantenimiento por sistema



Fuente: Bogantes (2016)

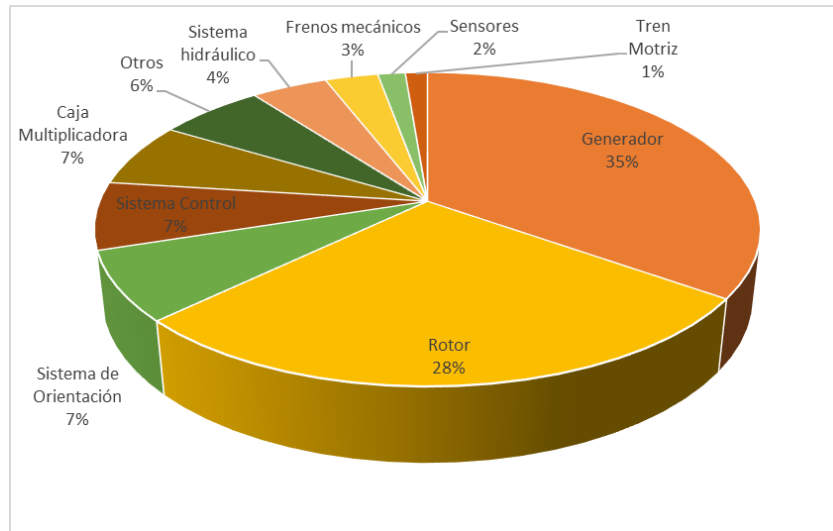
Gráfico 4.2 Pareto de costos de mantenimiento por sistema



Fuente: Bogantes (2016)

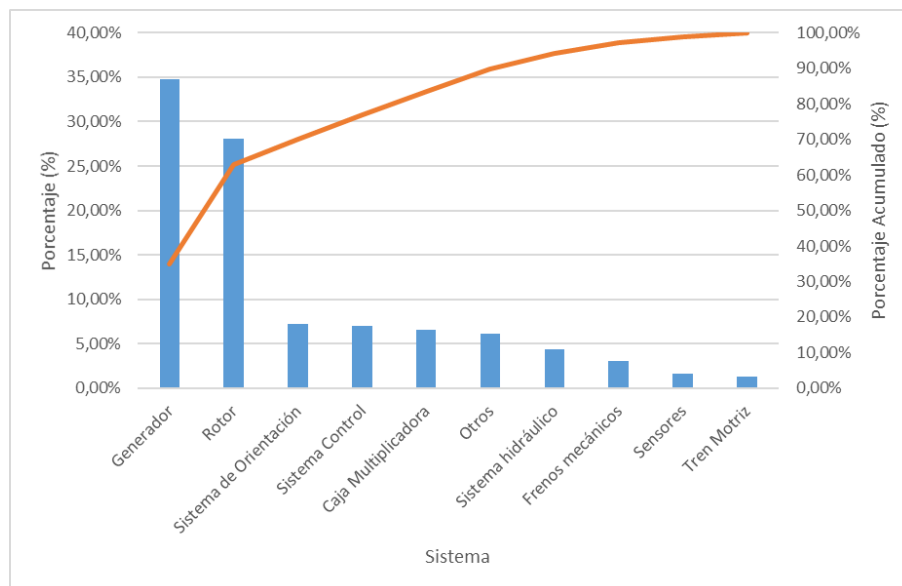
En el Gráfico 4.1 y Gráfico 4.2, se muestran los costos de mantenimiento por sistemas en el Parque Eólico Los Santos, y un gráfico de Pareto de dichos costos respectivamente. Se puede observar que el 80 % se encuentra comprendido por el generador, caja multiplicadora y el rotor.

Gráfico 4.3 Tiempos requeridos de mantenimiento por sistema



Fuente: Bogantes (2016)

Gráfico 4.4 Pareto de tiempos requeridos de mantenimiento por sistema



En el Gráfico 4.3 y el Gráfico 4.4, se presenta el porcentaje de los tiempos requeridos de mantenimiento de cada uno de los sistemas, así como el Pareto respectivo. Para este análisis se utilizaron los tiempos requeridos para realizar las labores de mantenimiento, no se incluyen tiempos por planeación, logística, paro de producción entre otros.

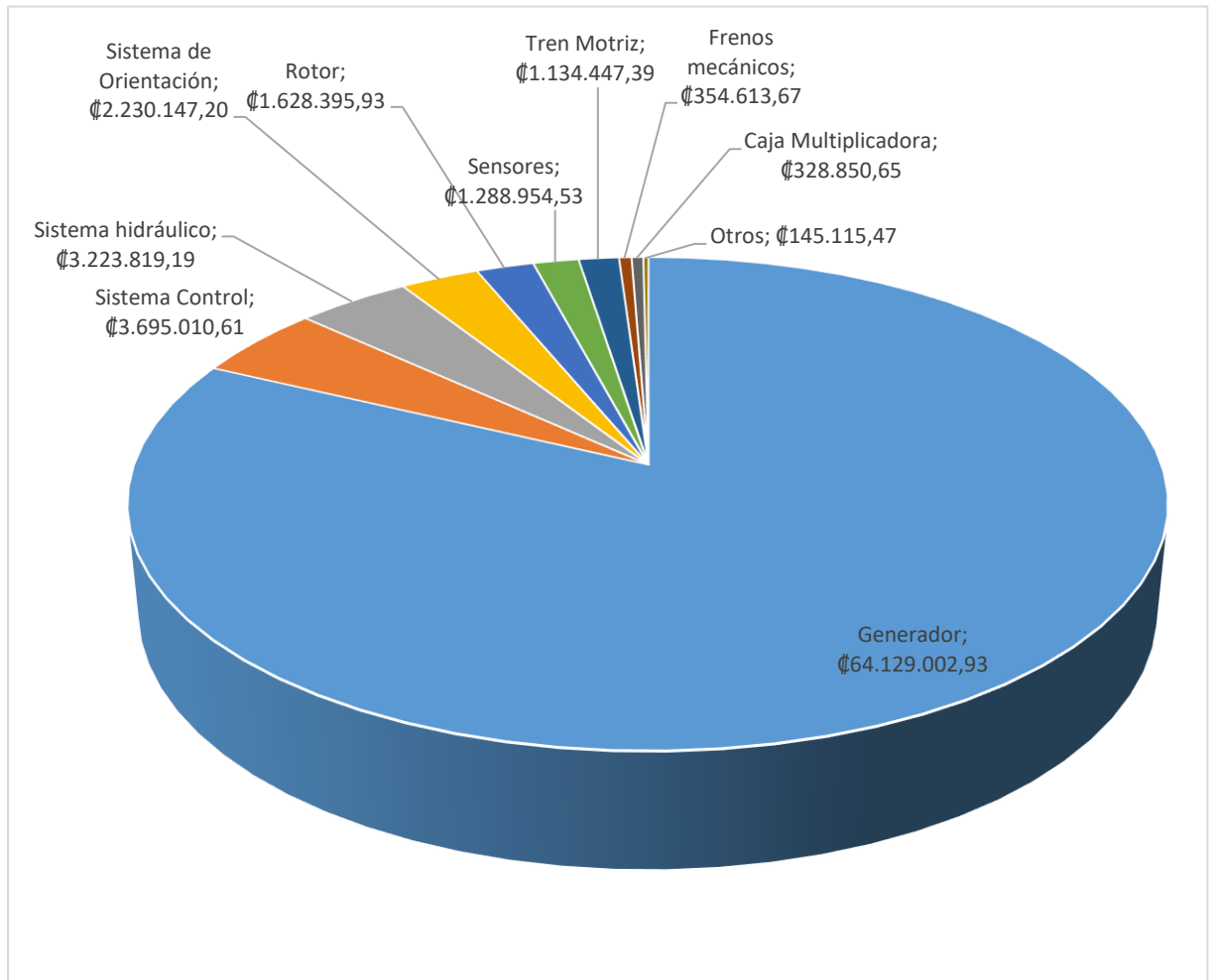
Se observa que el 80 % se encuentra conformado por el generador, rotor, sistema de orientación, sistema de control y caja multiplicadora.

Seguidamente, se realizará el desglose de los costos y tiempos medios de reparación para el mantenimiento correctivo y preventivo.

4.2.1.1 Mantenimiento Correctivo

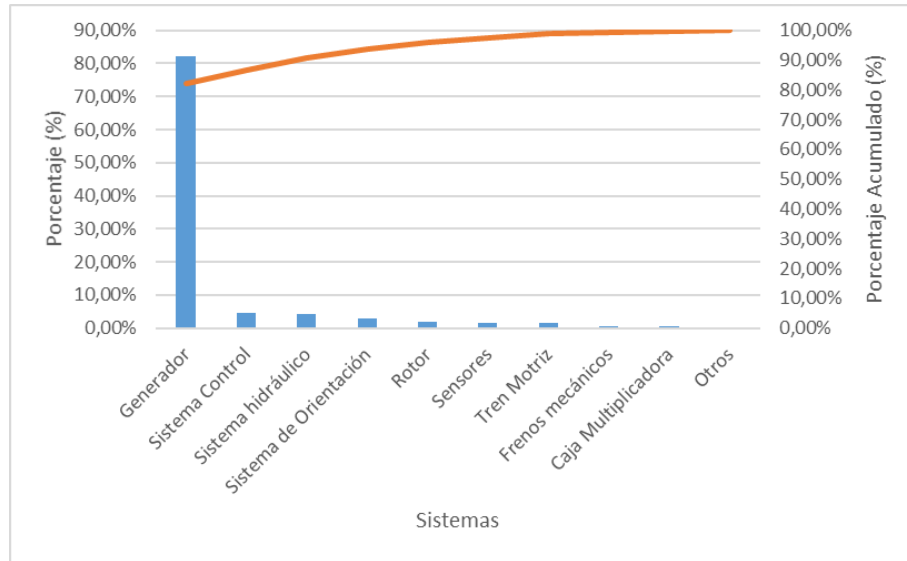
En la gráfica 4.5 y 4.6, se presentan los costos asociados al mantenimiento correctivo por sistema, y el Pareto de estos costos.

Gráfico 4.5 Costos por sistema del mantenimiento correctivo



Fuente: Bogantes (2016)

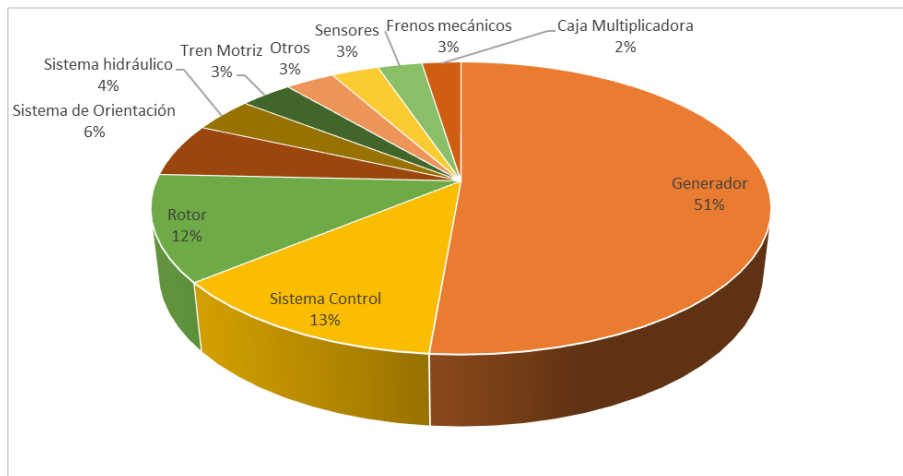
Gráfico 4.6 Pareto de Costos por sistemas para el mantenimiento correctivo



Fuente: Bogantes (2016)

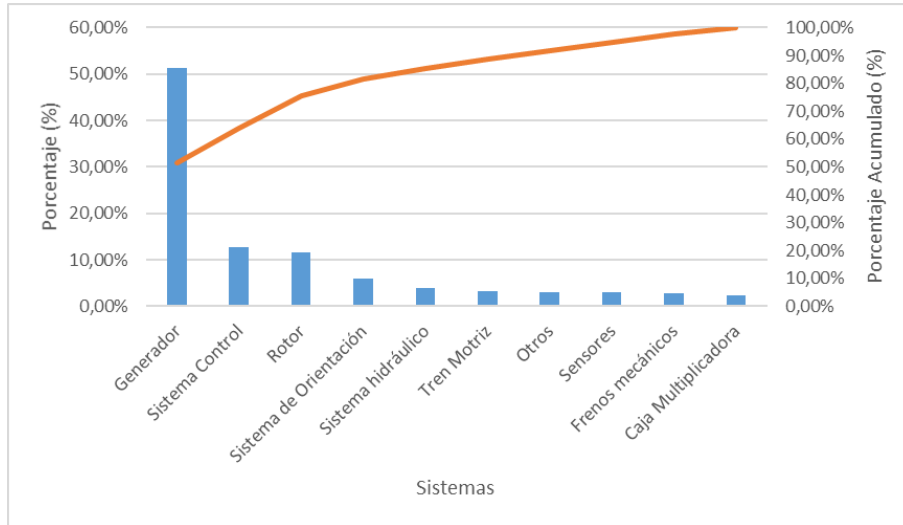
En el Gráfico 4.7 y el Gráfico 4.8, se muestran el porcentaje del tiempo requerido por mantenimiento correctivo por sistema, y el Pareto de estos, se puede observar que el 80 % corresponde al generador, Sistema de Control, Rotor y Sistema de Orientación.

Gráfico 4.7 Porcentaje del Tiempo requerido de mantenimiento por sistema para el mantenimiento correctivo



Fuente: Bogantes (2016)

Gráfico 4.8 Pareto del porcentaje del tiempo requerido de mantenimiento por sistema para el mantenimiento correctivo



Fuente: Bogantes (2016)

En la Tabla 4.1 se presentan los costos por mantenimientos correctivos por sistema, asociados a las labores, repuestos, insumos y mano de obra externa para cada uno de estos sistemas.

Tabla 4.1 Costos de mantenimiento correctivo por sistema

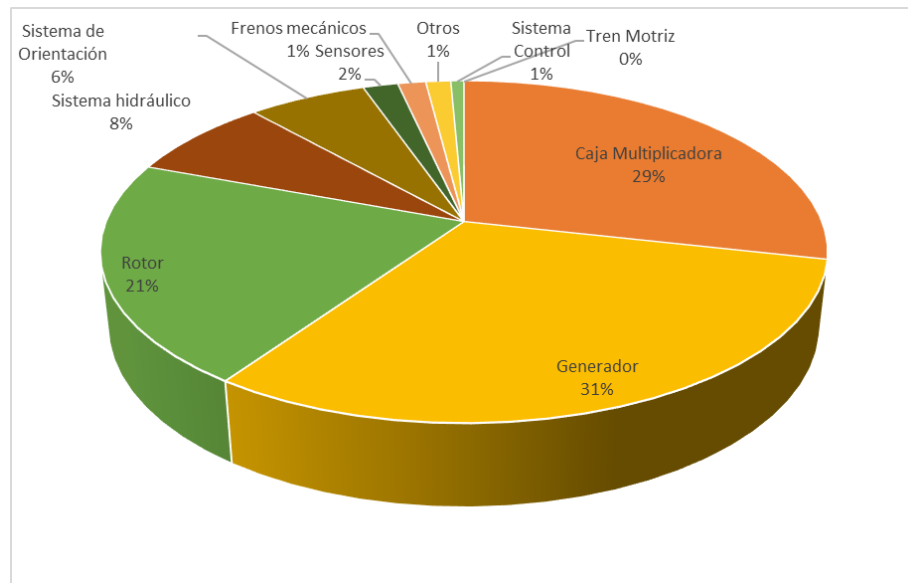
Sistema	Costo
Generador	€1.301.571,00
Rotor	€403.299,00
Sistema Hidráulico	€402.977,00
Tren Motriz	€378.149,00
Sensores	€214.826,00
Caja Multiplicadora	€115.721,28
Frenos Mecánicos	€65.752,00
Sistema de Orientación	€28.540,00
Sistema Control	€25.196,00
Otros	€22.917,00

Fuente: Bogantes (2016)

4.2.1.2 Mantenimiento Preventivo

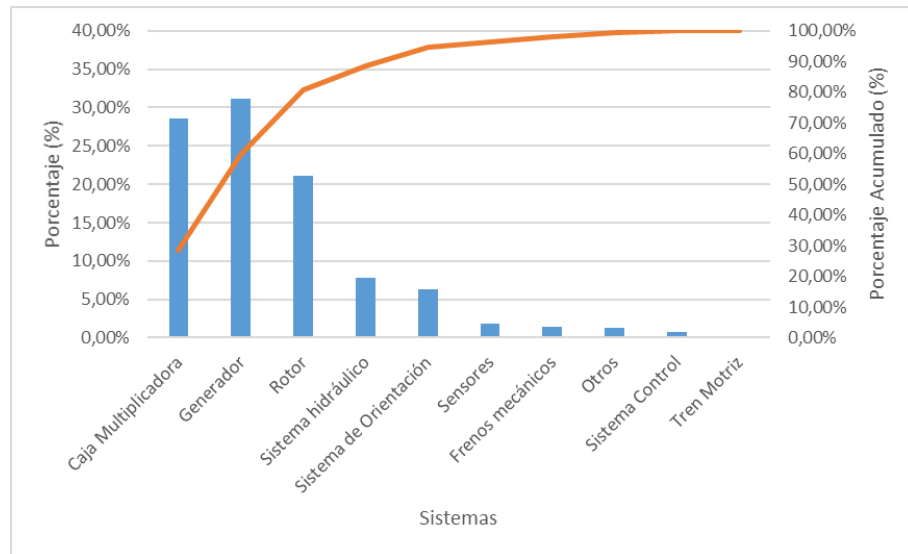
En el Gráfico 4.9 y el Gráfico 4.10, se presentan los costos asociados al mantenimiento preventivo por sistema, y el Pareto de estos costos. Se observa que el 80 % corresponde a la caja multiplicadora, generador y Rotor.

Gráfico 4.9 Costos por sistema para mantenimiento preventivo



Fuente: Bogantes (2016)

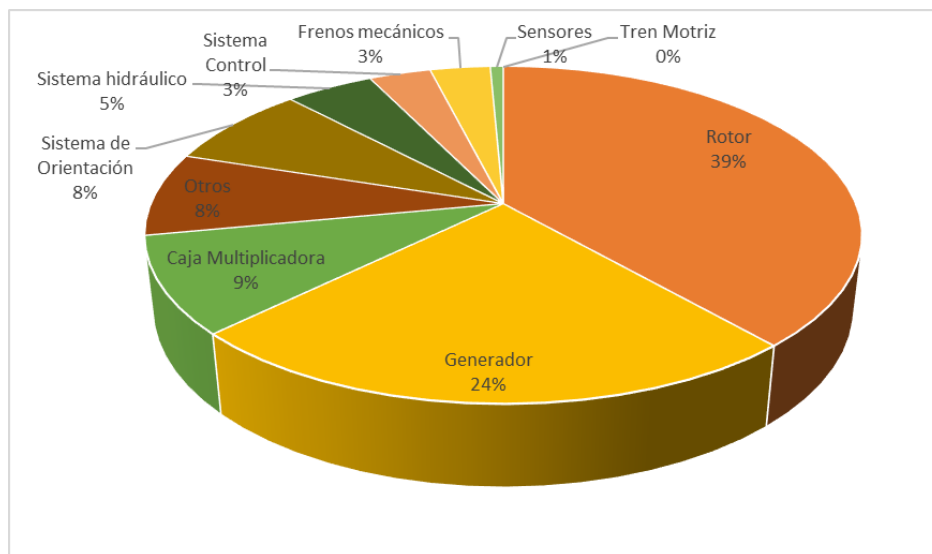
Gráfico 4.10 Pareto de Costos por sistemas para el mantenimiento preventivo



Fuente: Bogantes (2016)

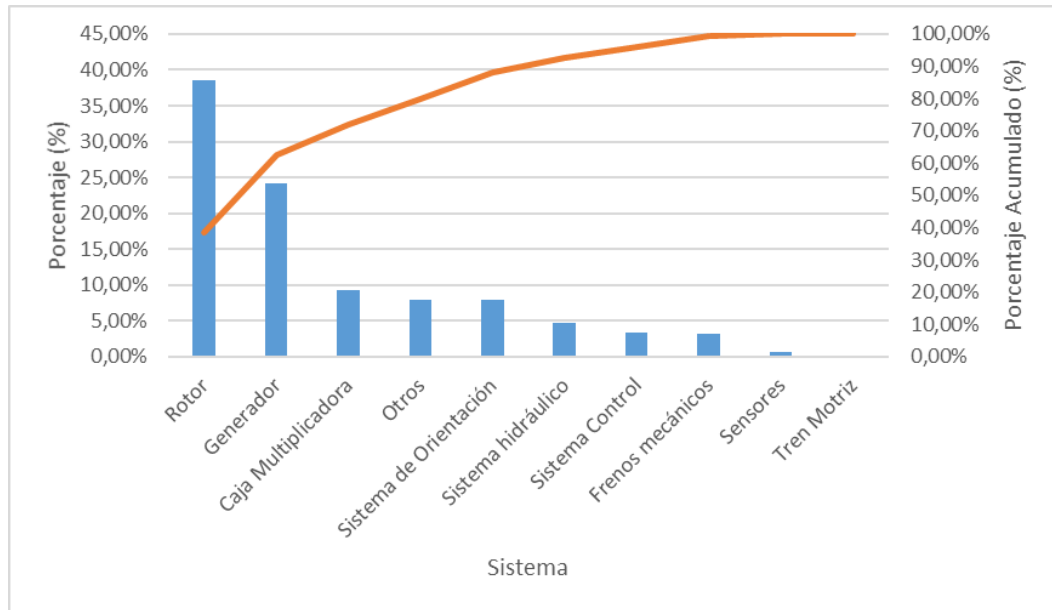
En el Gráfico 4.11 y el Gráfico 4.12, se muestran el tiempo requerido por mantenimiento preventivo por sistema, y el Pareto de estos, se puede observar que los pocos vitales corresponden al rotor, generador, caja multiplicadora, otros y el sistema de orientación.

Gráfico 4.11 Tiempos requeridos de mantenimiento por sistema para mantenimiento preventivo



Fuente: Bogantes (2016)

Gráfico 4.12 Pareto de tiempo requerido de mantenimiento por sistema para mantenimiento preventivo



Fuente: Bogantes (2016)

En la Tabla 4.2, se presentan los costos por mantenimientos preventivos por sistema, asociados a las labores, repuestos, insumos y mano de obra externa para cada uno de estos sistemas.

Tabla 4.2 Costos de mantenimiento preventivo por sistema

Sistema	Costo
Sensores	€357.429,64
Generador	€295.283,00
Caja Multiplicadora	€270.943,00
Rotor	€99.681,00
Sistema Hidráulico	€98.804,00
Sistema de Orientación	€45.712,00
Frenos Mecánicos	€22.553,00
Otros	€10.035,00
Sistema Control	€5.374,00

Fuente: Bogantes (2016)

Con base en la información anterior, se concluye que los componentes críticos y a los cuales se les propone el monitoreo en condición son:

1. Generador
2. Caja Multiplicadora
3. Rotor
4. Sistema Hidráulico

4.2.2 Variables de Condición y Redes Neuronales Propuestas para cada Sistema

Ya que la efectividad del CBM está en la precisión de la condición futura del equipo y la vida útil remanente (Adnan, 2010), sin embargo, la mayoría de estos métodos se basan en situaciones de carga constantes en el tiempo.

En el caso de los aerogeneradores, estos son sometidos a diferentes cargas, las cuales van a depender de la intensidad del viento. Para poder obtener una predicción más exacta al utilizar la predicción por medio de las ANN, Bogantes (2016), propone una nueva variable de entrada para todas las topologías propuestas por Loria (2016), la cual corresponde a un nodo de carga, con la finalidad de que al incorporar este, el sistema se comporte como un sistema de carga contante.

Por lo que las ANN propuestas para cada sistema, así como las variables que se proponen monitorear se muestran a continuación.

4.2.2.1 Generador

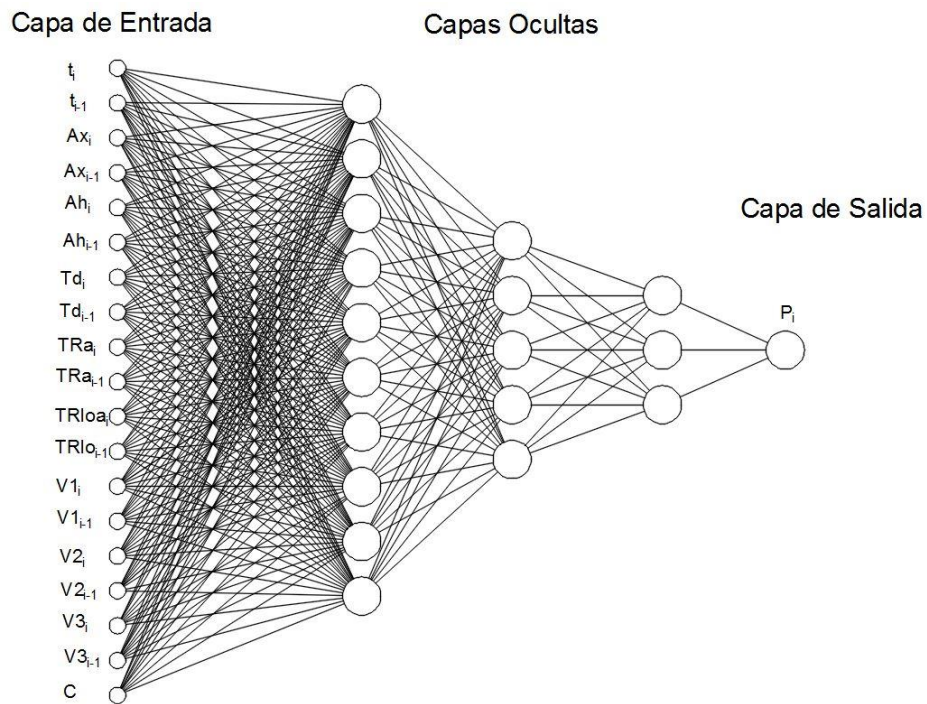


Figura 4.4 Topología de la ANN para el Generador

Fuente: Bogantes (2016)

Para este sistema, se propone el monitoreo de condición mediante las siguientes variables:

- a) Acelerómetro Axial (Ax)
- b) Acelerómetro horizontal (Ah).
- c) Temperatura de devanados del generador (Td)
- d) Temperatura del rodamiento del lado de acople (TRa).
- e) Temperatura del rodamiento del lado opuesto al de acople ($TRlo$).
- f) Voltaje de Línea 1 ($V1$).
- g) Voltaje de Línea 2 ($V2$).
- h) Voltaje de Línea 3 ($V3$).

4.2.2.2 Caja Multiplicadora

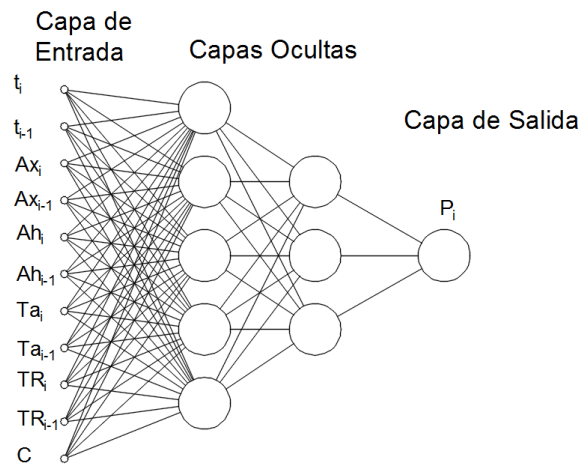


Figura 4.5 Topología de la ANN para la Caja Multiplicadora

Fuente: Bogantes (2016)

Para este sistema, son propuestas las siguientes variables:

- Temperatura de rodamiento de la caja multiplicadora (TR).
- El acelerómetro en posición axial (Ax).
- Acelerómetro en posición horizontal (Ah).
- Temperatura de aceite multiplicadora (Ta).

4.2.2.3 Sistema Hidráulico

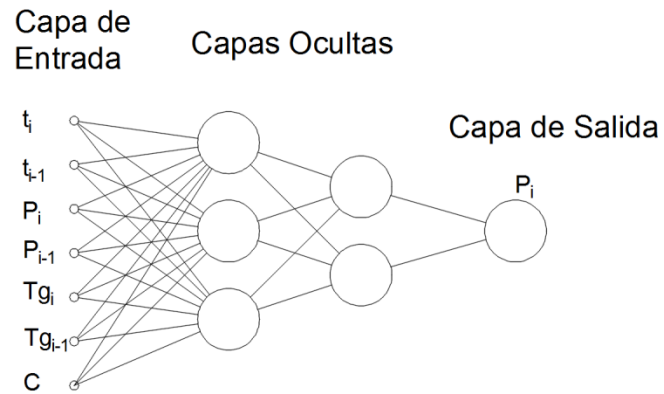


Figura 4.6 Topología de la ANN para el Sistema Hidráulico

Fuente: Bogantes (2016)

Para este sistema, son propuestas las siguientes variables:

- Presión del Grupo Hidráulico (P).
- Temperatura de Aceite del Grupo Hidráulico (Tg).

4.2.2.4 Rotor

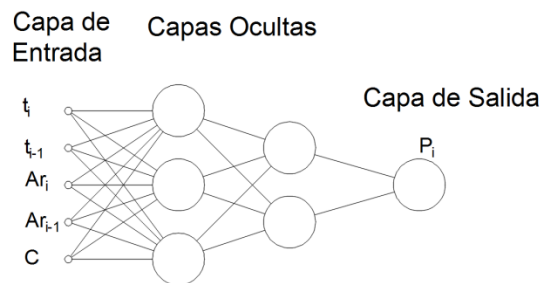


Figura 4.7 Topología de la ANN para el rotor

Para este sistema, son propuestas las siguientes variables:

- Acelerómetro en posición radial (Ar).

CAPÍTULO 5: Panorama de Implementación

Este capítulo trata de la situación actual referente al mantenimiento de los aerogeneradores G52/850, marca Gamesa de 850 kW, instalados en el Parque Eólico Los Santos. Se realizará una breve descripción del parque, de los softwares que ayudan con la operación y mantenimiento del mismo, condiciones de operación, seguidamente se pasará a describir el sistema hidráulico de estos aerogeneradores, así como su estado actual y finalmente, se determinarán las variables que representan mejor el comportamiento de dicho sistema.

5.1 Parque Eólico Los Santos

El Parque Eólico Los Santos, pertenece a la cooperativa COOPESANTOS, la cual se encarga de la generación y distribución a las comunidades de las zonas como se mencionó en el CAPÍTULO 1:. Se encuentra ubicado sobre la interamericana sur, entre casa Mata de Desamparados y La Paz de El Guarco.

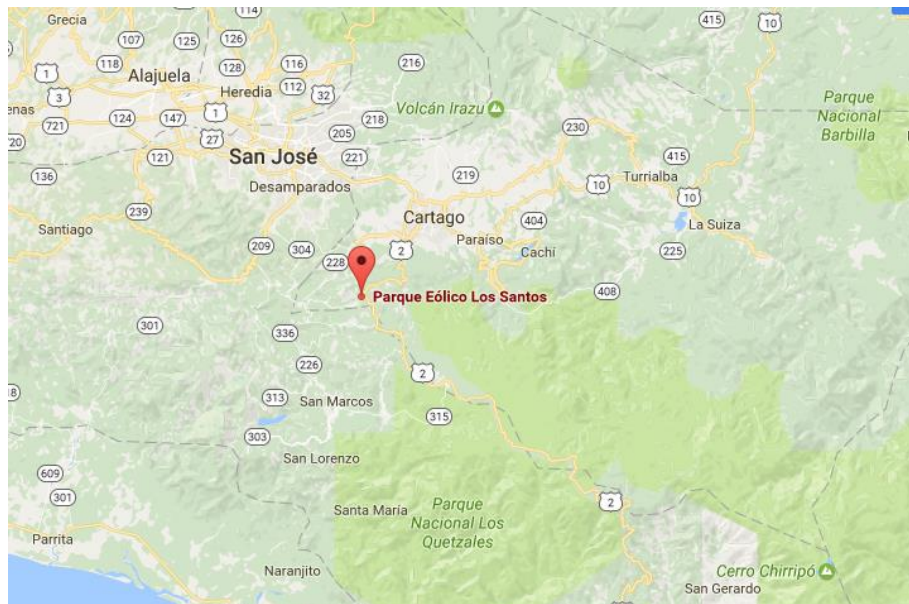


Figura 5.1 Ubicación Parque Eólico Los Santos

Fuente: Google Maps (2017)

Dicho proyecto se inauguró en octubre del 2011, cuenta con 15 unidades aerogeneradores, las cuales se encuentran instaladas en diferentes fincas que se numeraron de acuerdo a su adquisición cronológica por parte de COOPESANTOS. Los aerogeneradores se enumeran también, dependiendo de la finca en la que se encuentren. En la Tabla 5.1 se especifica los aerogeneradores que se encuentran en las diferentes fincas del parque. Y en la Figura 5.2 se puede observar su ubicación en el mapa.

Tabla 5.1 Ubicación de los Aerogeneradores en las Fincas del Parque Eólico Los Santos.

Aerogenerador	Finca
Aero 1	I
Aero 2	
Aero 3	II
Aero 4	III
Aero 5	
Aero 6	IV
Aero 7	
Aero 8	
Aero 9	
Aero 10	
Aero 11	V y VI
Aero 12	
Aero 13	
Aero 14	VII

Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

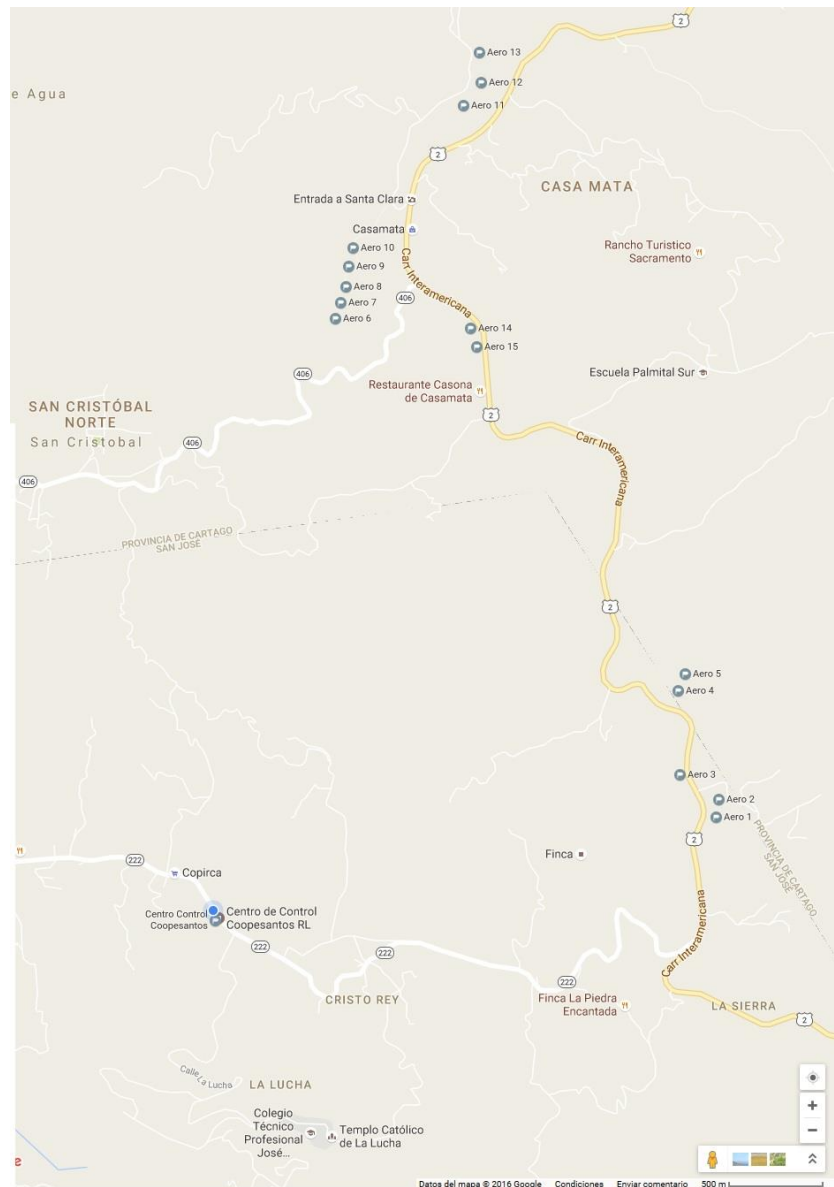


Figura 5.2 Ubicación de Unidades Aero-generadoras Parque Eólico Los Santos

Fuente: Google Maps (2017)

5.2 Panorama Actual

Seguidamente, se describirá los softwares que se utilizan en la operación y mantenimiento del Parque Eólico Los Santos, la situación actual de mantenimiento, y las condiciones de operación a las que se encuentra.

5.2.1 Softwares Utilizados

Actualmente COOPESANTOS cuenta con dos softwares para la operación y Mantenimiento del Parque Eólico, los cuales son: El MP y el SGIPE.

5.2.1.1 MPSoftware

Es un software profesional para control y administración del Mantenimiento (CMMS), tiene como objetivo principal ayudar en la administración de la gestión del mantenimiento de manera eficiente, documentando y organizando toda la información del departamento de mantenimiento.

Sus alcances son (Técnica Aplicada Internacional S.A. de C.V., 2016):

1. **Catálogo de Equipos:** Permite documentar información de los equipos, imágenes, planos, archivos adjuntos, localización, entre otros.
2. **Catálogo de Localizaciones:** Estructura en el MP el árbol de localizaciones que permite dejar documentada la localización de todos y cada uno de los equipos.
3. **Rutinas de Mantenimiento:** Documenta en el MP los planes de mantenimiento rutinario para equipos y localizaciones, indicando las actividades rutinarias que deben realizarse, así como la frecuencia con que debe realizarse cada actividad.
4. **Órdenes de Trabajo:** Analiza las fechas de trabajos programados e informa sobre los trabajos que deben realizarse en el período. Selecciona los trabajos y genere las órdenes de trabajo en forma automática desde el MP. A cada orden de trabajo que el usuario genera, el MP asigna un número de folio consecutivo para su control. En una misma orden de trabajo se pueden incluir opcionalmente, varios trabajos, tanto de mantenimiento rutinario como de mantenimiento no rutinario. También es posible incluir opcionalmente uno o varios equipos o localizaciones en una misma orden de trabajo.

5. **Solicitudes Vía Internet:** Reporta solicitudes de mantenimiento vía Internet. Las cuales llegan directamente, al personal de mantenimiento, se abre una ventana en la pantalla de los administradores de mantenimiento indicándoles sobre los trabajos que el personal reporta o solicita. Por otro lado, las personas que hacen una solicitud podrán consultar en Internet el estado que guarda su solicitud, es decir, si su solicitud ya fue leída, fecha programada para realizar el trabajo, si el trabajo ya fue realizado, etc.
6. **Calculo Automático de los Calendarios de Mantenimiento:** Marca las fechas cuando deben realizarse los diferentes trabajos de mantenimiento, encargándose el MP de mantener actualizados y al día dichos calendarios.
7. **Distribución Cargas de Trabajo:** Cuenta con herramientas que le ayudarán a distribuir las órdenes de trabajo entre el personal de mantenimiento en función de la especialidad y duración estimada de cada orden.
8. **Actualización de Trabajos Realizados:** Cuando el usuario reporta en el MP sobre algún trabajo de mantenimiento rutinario realizado, en forma automática el MP genera la fecha próxima para cuando dicho trabajo deba volver a realizarse. Conforme se van marcando los trabajos como realizados, un control gráfico muestra el avance de cada OT.
9. **Mediciones Predictivas:** Documenta en el MP el valor de las mediciones que realiza a sus equipos. El MP grafica dichas mediciones y lo mantiene informado sobre todos aquellos equipos con mediciones fuera o cercanas a límites.
10. **Inventario de Repuestos y Consumibles:** permite controlar en forma eficiente existencias de materiales y repuestos, movimientos de entradas y salidas, kardex, valuación del inventario por diferentes métodos, calcular el abastecimiento, proveedores, compras, etc. Otra característica es la opción de manejar multi almacenes y marcas equivalentes para un mismo producto, así como código de barras.
11. **Catálogo Mano de Obra:** En el quedan registrados los nombres, especialidades, costos por hora y costos extraordinarios del personal involucrado en las labores de mantenimiento.

12. **Catálogo de Proveedores y Servicios Externos:** Los equipos que se registren en el MP, podrán relacionarse con su respectivo proveedor. El usuario podrá consultar en línea la información del proveedor como por ejemplo, contactos, teléfonos. Podrá también formar un catálogo de los servicios que cada proveedor ofrece y documentar en el MP el consumo de servicios.
13. **Control de Resguardos y Devoluciones de Herramientas:** Permite controlar resguardos y devoluciones de todas las herramientas entregadas a los trabajadores. El programa permite entre otras cosas consultar en línea quien tiene o donde se encuentra cada una de las herramientas.
14. **Asociación de Recursos y Actividades:** Consiste en establecer para cada una de las actividades de mantenimiento rutinario, los recursos materiales (repuestos y consumibles), mano de obra, servicios externos y herramientas necesarios para realizarlas.
15. **Flujo de Recursos:** Calcula las cantidades de cada recurso por emplear en los siguientes días o meses, así como los costos programados.
16. **Vales de Almacén:** Genere los vales de almacén en forma automática en el MP y se podrá descargar al momento de generar su movimiento de salida desde el inventario de repuestos.
17. **Consumos:** Permite documentar el consumo de los repuestos, mano de obra y servicios externos utilizados durante la ejecución de los trabajos de mantenimiento.
18. **Cálculo Automático del Abastecimiento:** El Inventario de Repuestos consulta al MP para calcular el abastecimiento oportuno y justo a tiempo de los repuestos y consumibles que deberán adquirirse para cumplir con los programas de mantenimiento.
19. **Historial de Consumos y Trabajos Realizados:** Mantiene organizada, actualizada y disponible para consulta toda la información histórica referente a trabajos realizados y recursos utilizados.

20. **Gráfica Programado versus Realizado:** Realiza una gráfica en la que se comparan mensualmente la cantidad de actividades programadas y la cantidad de actividades realizadas.
21. **Análisis de Fallas y Causas Raíz:** Detecte los tipos de equipo que más fallas presentan, las fallas más frecuentes y sus causas raíz.
22. **Historia Gráfica:** forma gráfica se muestra la historia de mantenimientos efectuados a un equipo en un lapso de tiempo, mostrando periodos protegidos y periodos desprotegidos. Esta gráfica constituye un indicador para evaluar la vulnerabilidad de los equipos y en ella es posible visualizar que tan apegado a lo programado ha sido la ejecución de los trabajos de mantenimiento. Permite también relacionar fallas con los planes de mantenimiento ayudando a hacer los ajustes necesarios en los planes de mantenimiento para evitar que determinada falla vuelva a presentarse.
23. **Gráfica de Costos, Paros:** Genera gran cantidad de consultas, gráficas y reportes relacionados con la gestión del mantenimiento, como gráficas de costos, paros, etc.
24. **Índices de Mantenimiento:** calcula tres índices de mantenimiento (Tiempo Medio Entre Fallas, Tiempo Medio Para Reparación y Disponibilidad)
25. **Control de Garantías:** Documenta las garantías de cada equipo, ya sea que se trate de la garantía del equipo, de un repuesto o incluso la garantía por un servicio.
26. **Librerías:** Una librería es un archivo que contiene una serie de planes de mantenimiento prefabricados de diversos equipos típicos.
27. **Seguridad:** Permite dar de alta a los usuarios que tendrán acceso al MP. Los usuarios registrados tendrán acceso al programa mediante una clave de acceso y podrán tener permiso total o limitado para ingresar a diferentes módulos y ejecutar funciones determinadas.

5.2.1.2 SGIPE

Sistema de Gestión Integral de Parques Eólicos (SGIPE), fue desarrollado por Gamesa, permite la operación y monitoreo remoto en tiempo real de los aerogeneradores, mástil meteorológico y subestación eléctrica, cuenta con un diseño modular con herramientas de control de potencia activa y reactiva, ruido, sombras, estelas. Posee una arquitectura TCP/IP con interfaz web. (Gamesa, 2007)

Este sistema permite realizar la gestión de la explotación, información y mantenimiento, ya que comunica los elementos físicos instalados en los diferentes aerogeneradores, procesando las señales obtenidos de estos y la convierte en datos accesibles al usuario en diferentes formatos, almacenándolos para su análisis y explotación, mediante el sistema de adquisición de datos de un sistema SCADA.

El sistema SGIPE, permite el monitoreo en tiempo real de los datos obtenidos por los diferentes sensores, así como la operación remota del parque eólico, proporciona herramientas de regulación, generación automática de reportes, manejo de alarmas, es compatible con diferentes tipos de dispositivos como computadoras, smartphones y tablets, y permite el envío de avisos a través de SMS a teléfonos celulares.

Las siguientes son algunas de las pantallas que se pueden observar en el SGIPE:

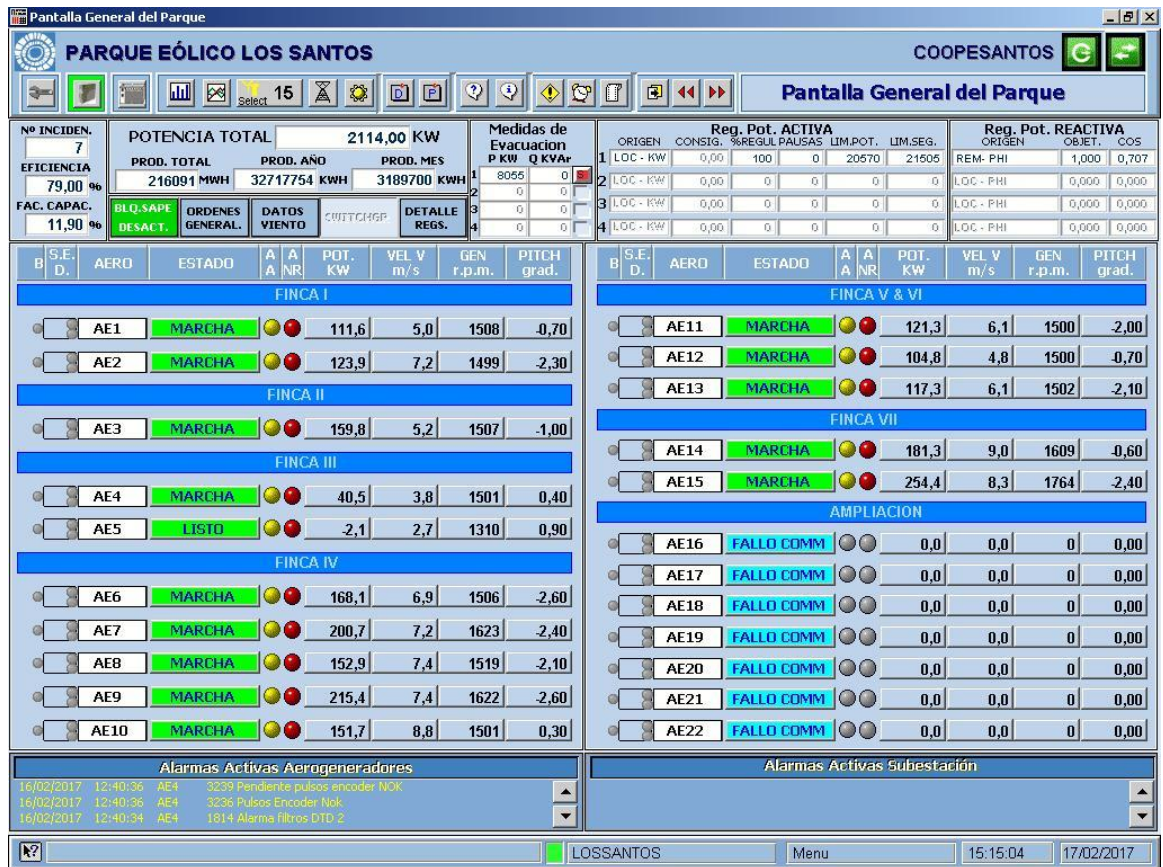


Figura 5.3 Pantalla Principal SGIPE

Fuente: SGIPE

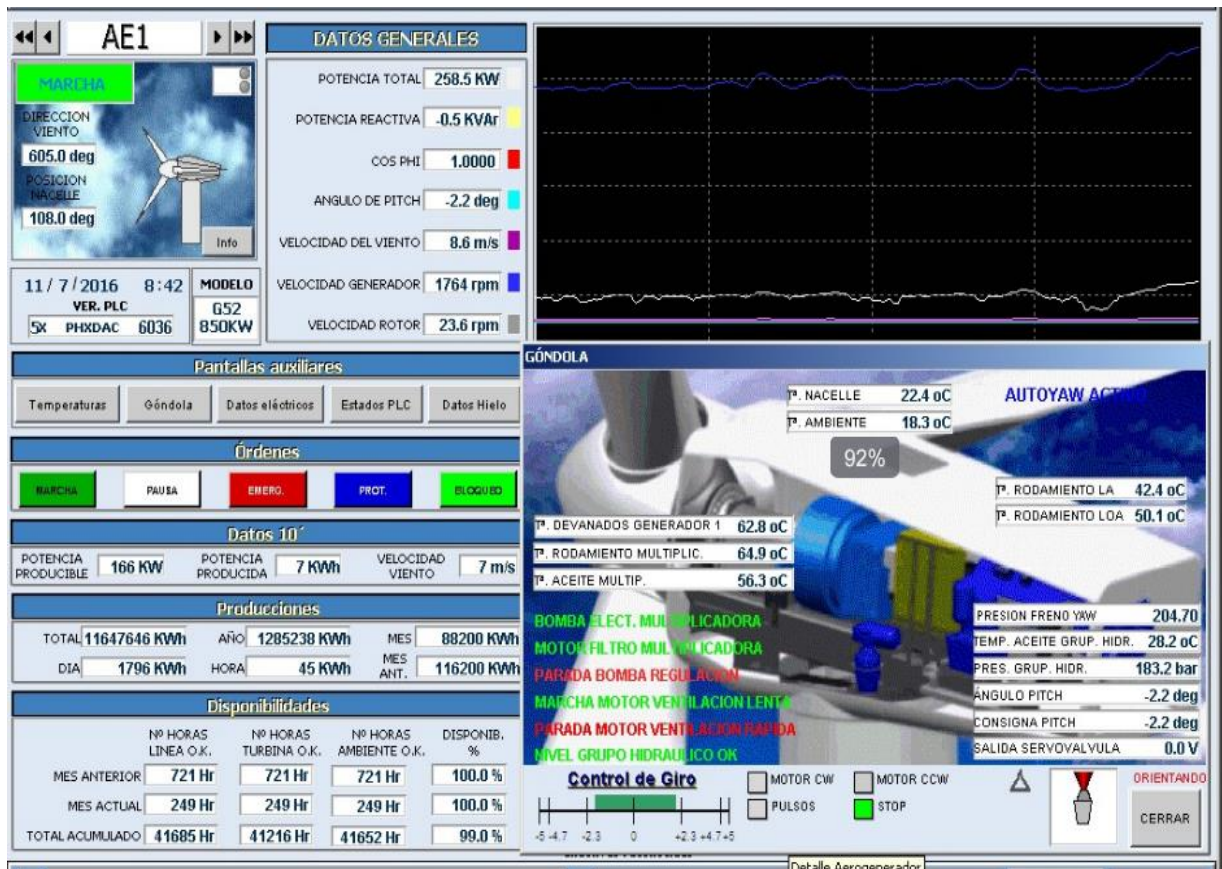


Figura 5.4 Pantalla de valores de operación de Góndola

Fuente: SGIPE

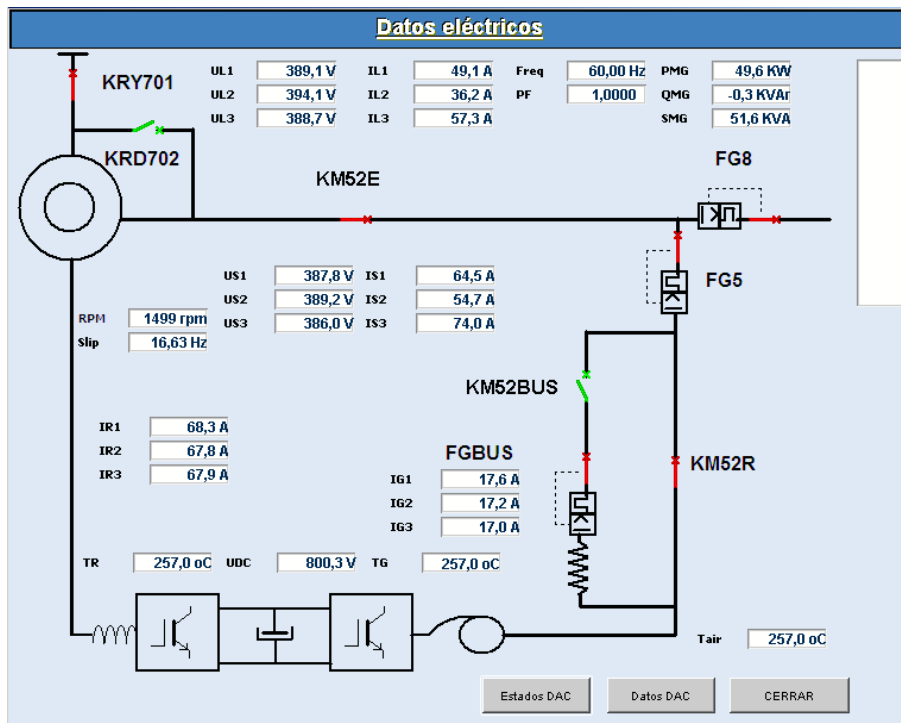


Figura 5.5 Ventana de datos eléctricos de operación

Fuente: SGIPE

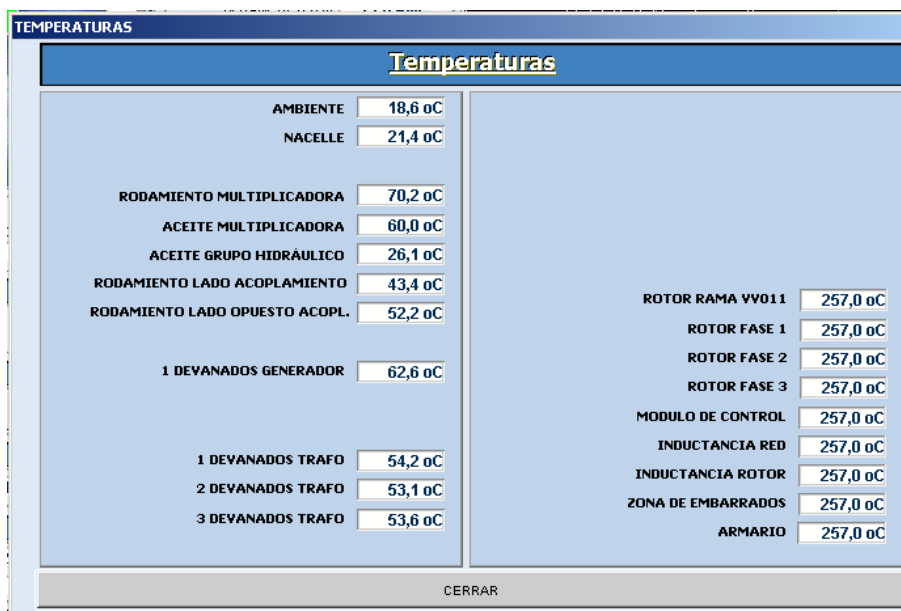


Figura 5.6 Ventana con datos de temperatura de operación

Fuente: SGIPE

Estados PLC		
ALARMA EMERGENCIA EN MÁQUINA	EMERGENCIA PITCH	VIENTO FRONTAL
ALARMA PAUSA EN MÁQUINA	MARCHA MANUAL GIRO CW	AUTOYAW DESHABILITADO
ALARMA STOP EN MÁQUINA	MARCHA MANUAL GIRO CCW	CONFIRMACIÓN CALEFACCIÓN MULTIPLICADORA
SENSOR YAW CCW	TOP NO DISPONIBLE	SENSOR 0º VELETA
SENSOR YAW CW	TURBINA NO OK	SENSOR 90º VELETA
SENSOR YAW STOP	TOP ENCLAVADO	MÁQUINA DESENROLLANDO
PULSOS SENSOR YAW	ESTADO DE OPERACIÓN REQUERIDO DESDE PANTALLA TÁCTIL (TOP; MARCHA ACOPLADA)	COMANDO RIN DESDE TELEMANDO
MOTOR CW ACTIVO	SOLICITUD RESET DESDE PANTALLA TÁCTIL (TOP)	COMANDO PAUSA DESDE TELEMANDO
MOTOR CCW ACTIVO	AEROGENERADOR EN EMERGENCIA	COMANDO EMERGENCIA DESDE TELEMANDO
TERMICO MOTOR CW	AEROGENERADOR EN STOP	COMANDO ACK ALARMAS DESDE TELEMANDO
MOTOR BOMBA GRUPO HIDRAULICO ACTIVO	AEROGENERADOR EN PAUSA	HABILITA CONTROL P DESDE TELEMANDO
FALLO FILTRO GRUPO HIDRAULICO	AEROGENERADOR EN MARCHA	HABILITA CONTROL Q DESDE TELEMANDO
FALLO PRESION FRENO	AEROGENERADOR EN LOCAL.COMANDOS CAMBIO OPERACIÓN REMOTOS NO PERMITIDOS	HABILITA CONTROL COSPHI DESDE TELEMANDO
FALLO TERMISTOR FRENO	CABLES ENROLLADOS ENTRE -2.3 Y -4.7 VUELTAS	CONEXIÓN EN ESTRELLA
TERMICO BOMBA DE GRUPO HIDRAULICO	CABLES ENROLLADOS ENTRE -4.7 Y -5.1 VUELTAS	CONEXIÓN EN TRIANGULO
FRENO APLICADO	CABLES ENROLLADOS ENTRE 2.3 Y 4.7 VUELTAS	PASO DE ESTRELLA A TRIANGULO
DISPARO TERMICO MOTOR CCW	CABLES ENROLLADOS ENTRE 4.7 Y 5.1 VUELTAS	PASO DE TRIANGULO A ESTRELLA
MARCHA VENTILADOR LENTO	CABLES ENROLLADOS ENTRE -2.3 Y 2.3 VUELTAS	ENTRADA BOMBA ELECTRICA MULTIPLICADORA
TERMICO VENTILADOR GENERADOR LENTO	VIENTO LATERAL IZQUIERDO	ENTRADA FILTRO SUPLETORIO MULTIPLICADORA
MARCHA VENTILADOR RAPIDO	VIENTO LATERAL DERECHO	DATOS SMP
TERMICO VENTILADOR GENERADOR RAPIDO	VIENTO TRASERO	
FALLO NIVEL GRUPO HIDRAULICO		

Figura 5.7 Ventana con estados de operación del PLC

Fuente: SGIPE

Los aerogeneradores G52/850 del Parque Eólico Los Santos cuentan además con un software SMP, el cual corresponde al sistema desarrollado por Gamesa para la detección prematura de posibles fallas en los principales componentes, sin embargo, no es utilizado, ya que representa un alto costo asociado a la respectiva licencia. (Bogantes, 2016)

5.3 Estado Actual de los Componentes del Sistema Hidráulico

Para obtener una mejor eficiencia en el proceso de obtención de energía eléctrica a través de la energía cinética que el viento aporta en las aspas, es necesario que estas se encuentren en un ángulo de incidencia óptimo, así mismo, en situaciones de emergencia, o cuando la velocidad del viento es mayor a la permitida para la generación de energía, es necesario rotar el ángulo de las aspas para disminuir la incidencia sobre ellas.

Este control de la posición de las aspas, se realiza gracias al sistema hidráulico, además este también se encarga de accionar el freno del rotor.

El Parque Eólico Los Santos, se encuentra en funcionamiento desde noviembre del 2011, por lo que ya han estado en operación por más de 5 años, es por esto que es necesario conocer el estado actual de los componentes del sistema hidráulico del aerogenerador en estudio.

El mantenimiento preventivo que se realiza a los aerogeneradores de este parque consiste principalmente en las recomendaciones del fabricante. Al consultar los historiales de mantenimiento del aerogenerador número 5, se concluye lo siguiente:

1. El aerogenerador número 5 se puso en marcha en noviembre del 2011, iniciando todos sus sistemas en buen estado, por lo que el sistema hidráulico tiene 5 años de funcionamiento.
2. La última rutina de mantenimiento se aplica el 26 de abril del 2017.

Al realizar la última rutina de mantenimiento se deja los sistemas en las siguientes condiciones.

5.3.1 Grupo Hidráulico

Desde que COOPESANTOS asume el mantenimiento y operación del PELS, se han realizado 6 rutinas de mantenimiento preventivo y un mantenimiento correctivo a este sub sistema. Las condiciones que presenta el equipo después de la última intervención el 26 de Abril del 2017, se numeran a continuación.

1. Se realiza el cambio del Filtro de Aceite del Grupo Hidráulico.
2. El último cambio de aceite del grupo hidráulico se realizó en octubre del 2016.
3. Se determina que la presión de precarga del acumulador de pitch sea de 80 bares.
4. Se comprueba el buen estado de los filtros de aire.
5. Se comprueba que no existen fugas de aceite en la góndola.
6. Se comprueba que las mangueras se encuentran en buen estado.

7. Se comprueba el buen funcionamiento del intercambiador del Grupo Hidráulico.
8. Se comprueba el nivel de aceite del grupo hidráulico es el adecuado.
9. Se comprueba que la presión de activación de la válvula reductora sea de 200 bares, con el freno aplicado.
10. Se comprueba que la presión de activación de la válvula de seguridad sea de 220 bares.

Tabla 5.2 Rutina de Mantenimiento Preventivo del Grupo Hidráulico del Aerogenerador número 5 PELS

Actividad	Cumplimiento
CABIO DEL FILTRO DE ACEITE DEL GRUPO HIDRÁULICO	✓
CAMBIO DE ACEITE DEL GRUPO HIDRÁULICO	✓
COMPROBAR. PRESIÓN DE PRECARGA. ACUMUL. DE PITCH	✓
ESTADO DE LOS FILTROS DE AIRE SUSTIT. SI PROCEDE	✓
FUGAS DE ACEITE EN LA NACELLE	✓
INSPECCIÓN DE MANGURAS Y CAMBIO SI PROCEDE	✓
INSPECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DEL GRUPO HIDRÁULICO	✓
NIVEL DE ACEITE DEL GRUPO HIDRÁULICO	✓
PRESIÓN DE TARAJE DE VÁLVULA REDUCTORA POS 24	✓
TARAJE DE LA VÁLVULA DE SEGURIDAD POS 13	✓

Fuente: 6.2.1 MPsoftware

5.3.2 Sistema de Freno

Desde que COOPESANTOS asume el mantenimiento y operación del PELS, se han realizado 6 rutinas de mantenimiento preventivo a este sub sistema. Las condiciones que presenta el equipo después de la última intervención se numeran a continuación.

1. Se verifica que la presión de precarga del acumulador del freno sea de 180 bares.
2. Se verifica que no existan fugas de aceite en el circuito hidráulico del sistema de Freno.
3. Se verifica el correcto funcionamiento de la válvula de freno.

4. Se comprueba que la presión de activación de la válvula de seguridad del sistema de freno sea 220 bares.
5. Se comprueba que la presión de activación del presostato del sistema de freno es la correcta.

Tabla 5.3 Rutina de Mantenimiento Preventivo del Sistema de Freno del Aerogenerador número 5 PELS

Actividad	Cumplimiento
PRESIÓN DE PRECARGA DEL ACUMULADOR DEL FRENO	✓
FUGAS DE ACEITE EN CIRCUITO HIDRÁULICO SIST.FRENO	✓
FUNCIONAMIENTO DE ELECTRVÁLVULA DE FRENO	✓
INSPECCIÓN VISUAL DE LAS PASTILLAS DE FRENO	✓
INSPECCIÓN VISUAL DEL DISCO DE FRENO	✓
PRESIÓN. TARAJE. VALVULA DE SEGURIDAD SIST.FRENO	✓
PRESIÓN.TARAJE.PRESOSTATO SIST.FRENO	✓

Fuente: 6.2.1 MPsoftware

5.3.3 Sistema de Pitch

Desde que COOPESANTOS asume el mantenimiento y operación del PELS, se han realizado 6 rutinas de mantenimiento preventivo a este sub sistema. Las condiciones que presentan los elementos relacionados con el sistema hidráulico después de la última intervención se numeran a continuación.

1. Se comprueba el correcto funcionamiento de la electroválvula de emergencia.
2. La válvula proporcional aprueba el test de flujo que se realiza como parte del mantenimiento preventivo.

Tabla 5.4 Rutina de Mantenimiento Preventivo del Sistema de Pitch del Aerogenerador número 5 PELS

Actividad	Cumplimiento
COMPROBAR CALIBRACIÓN BALLUF. TEST TOP(+) TOP(-)	✓
COMPROBAR FUNCIONAMIENTO. ELECTROVÁLVULA DE EMERG.	✓
ENGRASAR CAJA DE RODAMIENTOS	✓
ENGRASAR CASQUILLO SOPORTE EJE HUECO-EJE HUECO	✓
ENGRASAR CASQUILLO SOPORTE EJE HUECO-EJE HUECO	✓
HOLGURA DEL EJE HUECO DEL PITCH	✓
INSPE.ICASQUILLO DESLIZAMIENTO BARRA ANTIRROTACIÓN	✓
INSPECCIÓN VISUAL .BARRA DE ANTIROTACIÓN Y ENGRASE	✓
RÓTULAS DE LAS BIELAS PARA DETECTAR POLVO DE ÓXIDO	✓
TEST DE FLUJO, A LA VÁLVULA PROPORCIONAL	✓
TUERCA FINAL DEL EJE EMPUJADOR O SUPERBOLT	✓
UNIÓN ATORNILLADA CILINDRO-MULTIPLICADORA	✓
UNIÓN ATORNILLADA DE LA CAJA DE ROD. Y LA ESTRELLA	✓
UNIÓN ATORNILLADA DE TAPA CAJA DE RODAMIENT Y CAJA	✓

Fuente: 6.2.1 MPsoftware

5.3.4 Sistema de Yaw

Desde que COOPESANTOS asume el mantenimiento y operación del PELS, se han realizado 6 rutinas de mantenimiento preventivo a este sub sistema. Las condiciones que presentan los elementos relacionados con el sistema de Yaw después de la última intervención se numeran a continuación.

1. Se verifica que no existan fugas en los elementos del sistema hidráulico del sistema de freno auxiliar.
2. Se verifica que no existan fugas en los elementos del sistema hidráulico del sistema Yaw.
3. Se verifica que la presión de precarga del acumulador del freno yaw sea la correcta sea de 130 bares.
4. Se verifica que la presión de activación de la válvula reductora del circuito de freno yaw sea de 200 bares.
5. Se verifica que la presión de Yaw en estado de retención sea de 30 bares.

Tabla 5.5 Rutina de Mantenimiento Preventivo del Sistema Yaw del Aerogenerador número 5 PELS

Actividad	Cumplimiento
DESGASTE DE LAS PASTILLAS DEL FRENO AUXILIAR	✓
FUGAS EN ELEM.HIDRAULICOS DEL SIST. FRENO AUXILIAR	✓
FUGAS HIDRÁULICAS EN EL SISTEMA YAW	✓
INSPECCIÓN CUENTAVUELTAS Y SU SOPORTE	✓
INSPECCIÓN DE FUGAS DE ACEITE EN MOTOREDUCTORA	✓
INSPECCIÓN DE LA CORONA DENTADA	✓
INSPECCIÓN DE LA PINZA DE FRENO	✓
INSPECCIÓN DE SECTORES DISCO DE FRENO AUXILIAR	✓
INSPECCIÓN DEL SISTEMA DE YAW	✓
INSPECCIÓN DEL STOP PLATES HORIZONTALES	✓
LUBRICACIÓN DE PETP'S AXIALES	✓
LUBRICACIÓN ED LA CORONA DENTADA	✓
MEDICIÓN INDECT.DESGASTE DE PET'S RADIALES	✓
NIVEL DE ACEITE DE LA MOTOREDUCTORAS	✓
PAR DE APRIETE.TORNILL. APILADOS EN MORDAZAS PASIV	✓
POLVO DE DESGASTE PETP EN PLATAFORMA SUPERIOR	✓
PRESFORMADOS DE LOS CABLES DE POTENCIA	✓
PRESIÓN DE PRECARGA DEL ACUMUL.GRUP.HIDRA.AUX.YAW	✓
PRESIÓN DE PRECARGA DEL ACUMULADOR. FRENO DE YAW	✓
PRESIÓN DE TARADO VÁLVULA REDUCT.CIRCUIT.FRENO YAW	✓
PRESIÓN DEL YAW EN ESTADO DE RETENCIÓN	✓
UNIÓN ATORNILLADA ENTRE CORONA Y LA TORRE	✓
UNIÓN ATORNILLADA ENTRE MORDAZAS Y EL BASTIDOR	✓
UNIONES ATORNILLADAS EN LAS MOTORREDUCTORAS	✓

Fuente: 6.2.1 MPsoftware

5.3.5 Situación Actual de Mantenimiento

A partir del 2014, COOPESANTOS asume la Operación y Mantenimiento del Parque Eólico Los Santos, ya que los años posteriores estas funciones las realizaba Gamesa. Para cumplir estas funciones, COOPESANTOS posee un departamento de Operación y mantenimiento, el cual se encuentra conformado por un Ingeniero quien dirige la jefatura y tres técnicos que se encargan de las labores de mantenimiento.

Actualmente, las rutinas de mantenimiento que se realizan se basan principalmente en las recomendaciones del fabricante, las cuales se pueden encontrar en las secciones de anexos.

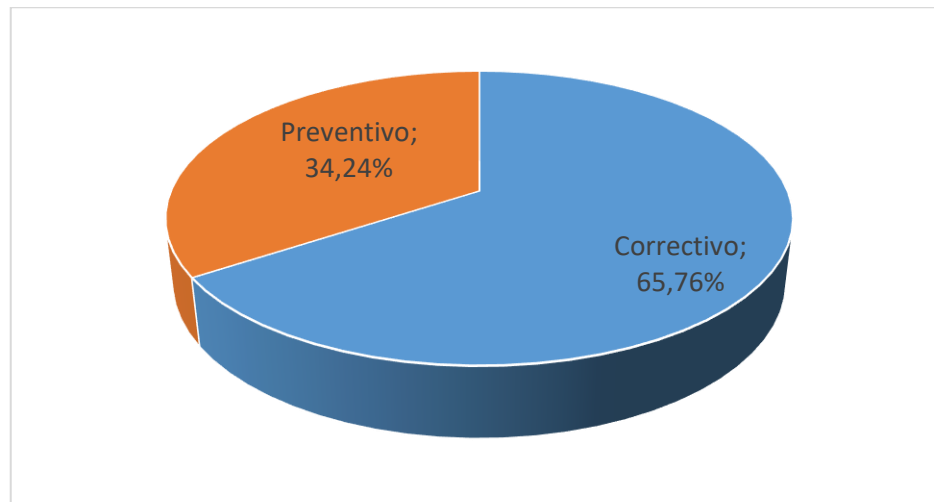
5.3.6 Historiales de Mantenimiento.

Para realizar esta sección, se obtuvieron informes del MPsoftware utilizado para la operación y mantenimiento del Parque Eólico Los Santos. Dichos datos inician cuando COOPESANTOS asume el mantenimiento y operación de este parque, por lo que los siguientes datos comprenden el lapso de 29 de julio de 2014 hasta el 13 de julio del 2016.

Como se mencionó anteriormente, en el Parque Eólico Los Santos, actualmente, las rutinas de mantenimiento se basan principalmente en las recomendaciones del fabricante, sin embargo, dichas recomendaciones no contemplan el estado actual de los equipos, es decir, el deterioro que estos tienen con el tiempo o por la carga que se ven sometidos, esto se evidencia en el alto índice de mantenimiento correctivo que se debe aplicar a los equipos.

Como se puede observar en el Gráfico 5.1, los costos de mantenimiento correctivo desde el 2014 hasta el 2016, corresponden a un 66% de los costos totales de mantenimiento.

Gráfico 5.1 Porcentaje de Costos por Tipo de Mantenimiento para los Aerogeneradores del Parque Eólico Los Santos, comprendido entre 13 Julio 2014 y 23 Julio 2016.

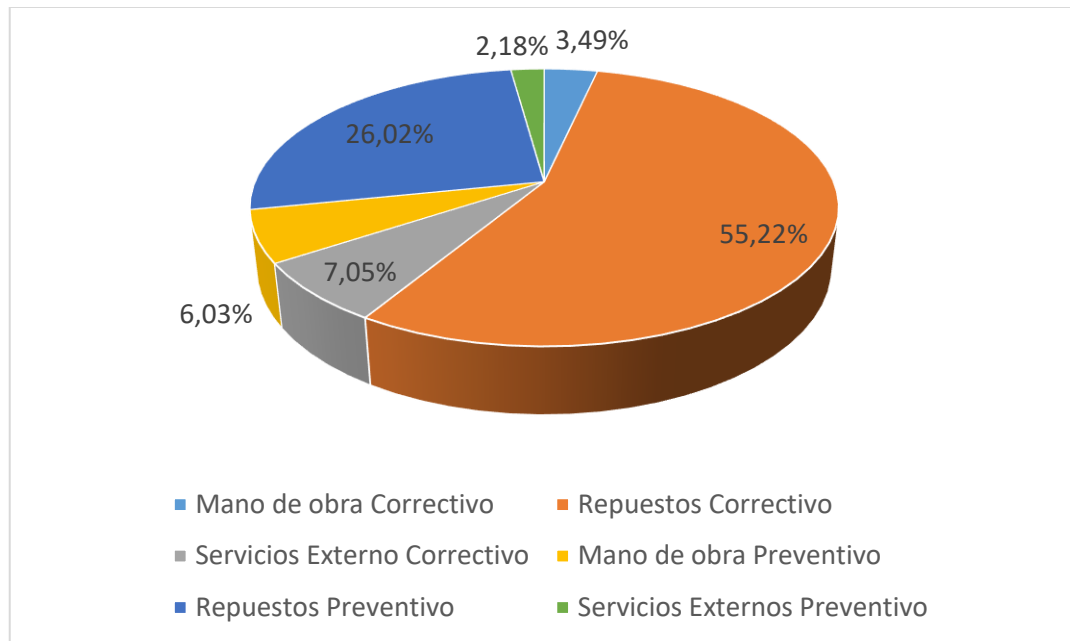


Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Como se sabe, el mantenimiento correctivo es un tipo de mantenimiento en el cual se deben emplear más recursos económicos y tiempo, ya que se debe incurrir en compra de repuestos de emergencia, si no se tiene en stock el elemento que se debe reemplazar, no se puede planificar las intervenciones, entre muchas otras desventajas.

Además a esto, debe sumársele que gran parte de la adquisición de repuestos para el parque eólico Los Santos deben ser traídos desde España, por lo que la entrega de los mismos requiere más tiempo, debido a esto, si no se tiene una buena planificación del mantenimiento, se deben optar por mantener un alto stock de repuestos, para poder atender los mantenimientos correctivos que se presenten, lo que a su vez se traduce en mayores costos. En COOPESANTOS, la distribución de los costos de mantenimiento se representa en el **¡Error! No se encuentra el origen e la referencia..**

Gráfico 5.2 Porcentaje de la Distribución de Costos de Mantenimiento para los Aerogeneradores del Parque Eólico Los Santos, comprendido entre 13 Julio 2014 y 23 Julio 2016.



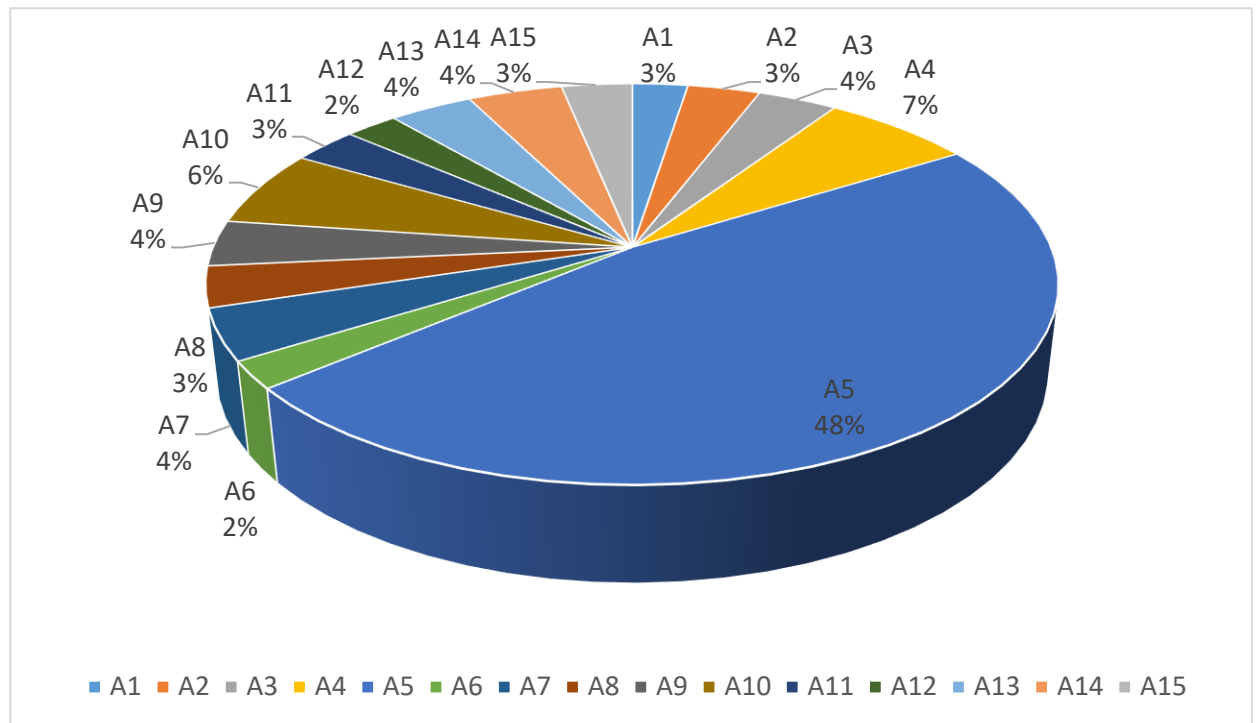
Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Como se puede observar, los repuestos asociados al mantenimiento correctivo, representan más del 50% de los costos de mantenimiento.

5.3.7 Costos Asociados a los Aerogeneradores

Cada aerogenerador se ve sometido a diferentes cargas, dependiendo de la incidencia del viento en ellos, es por esto que cada uno de ellos requerirá un grado de mantenimiento diferente, seguidamente, se muestran la distribución de los costos asociados a los 15 aerogeneradores del PELS.

Gráfico 5.3 Porcentaje de Costos Por Aerogenerador del Parque Eólico Los Santos, comprendido entre 13 Julio 2014 y 23 Julio 2016.

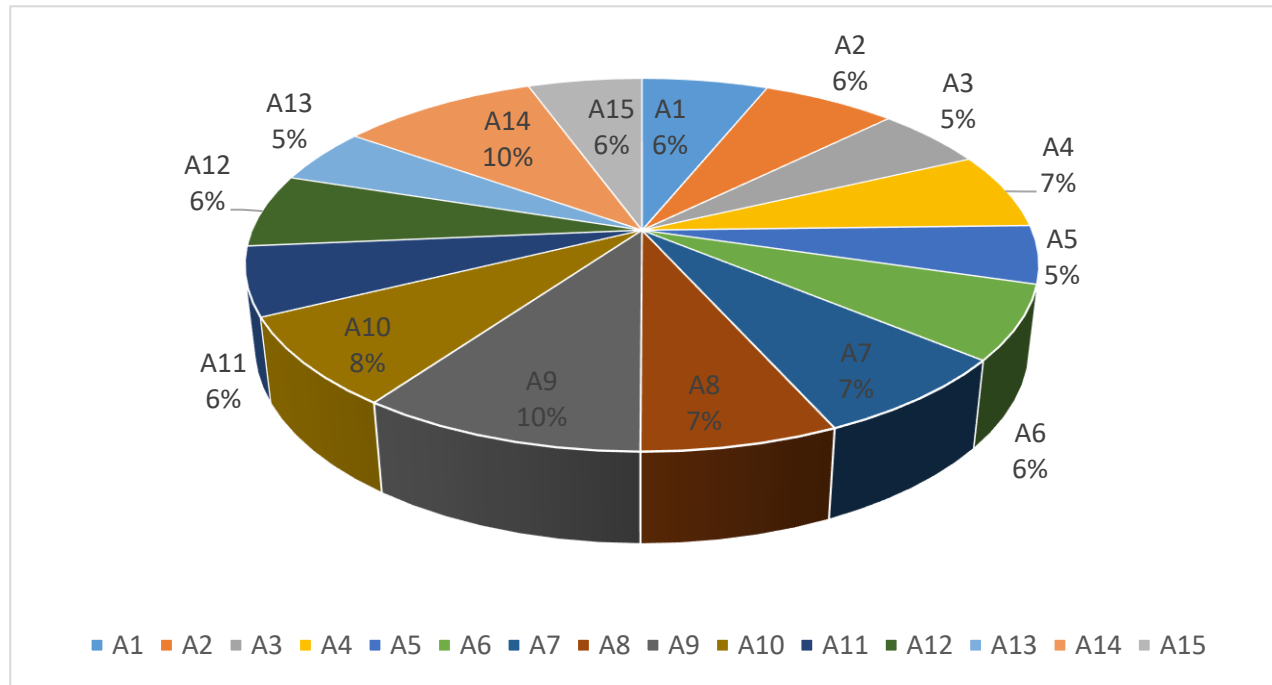


Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

5.3.7.1 Mantenimiento Preventivo

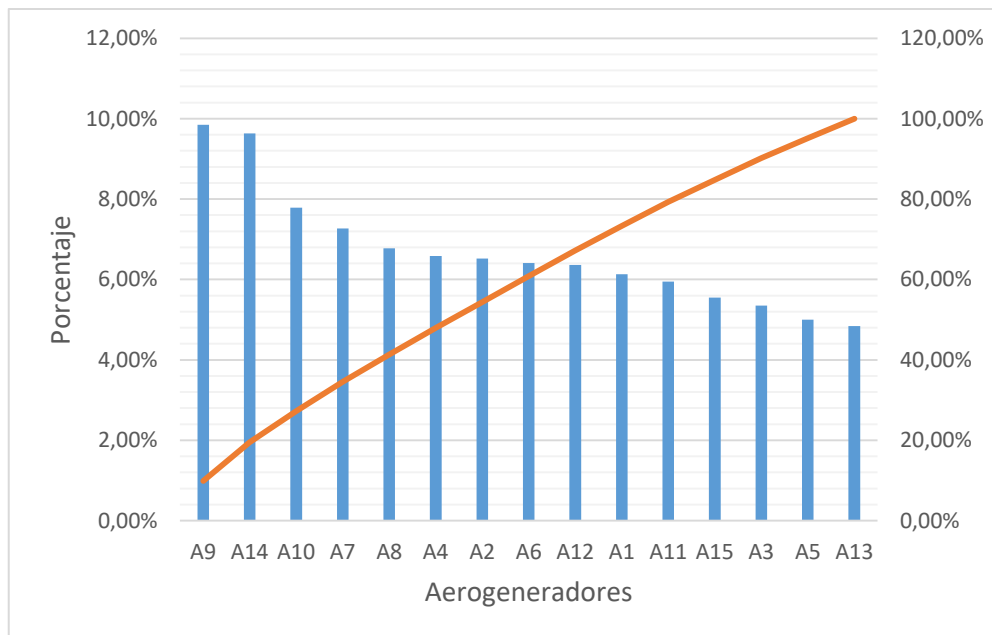
Como se puede observar en el Gráfico 5.3, el aerogenerador número 5 sobresale con respecto a los demás aerogeneradores, por lo que a continuación se desarrollará el desglose de los costos por tipo de mantenimiento.

Gráfico 5.4 Porcentaje de Costos por Mantenimiento Preventivo por Aerogenerador del Parque Eólico Los Santos, comprendido entre 13 Julio 2014 y 23 Julio 2016.



Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Gráfico 5.5 Pareto de los costos de Mantenimiento Preventivo Por Aerogenerador



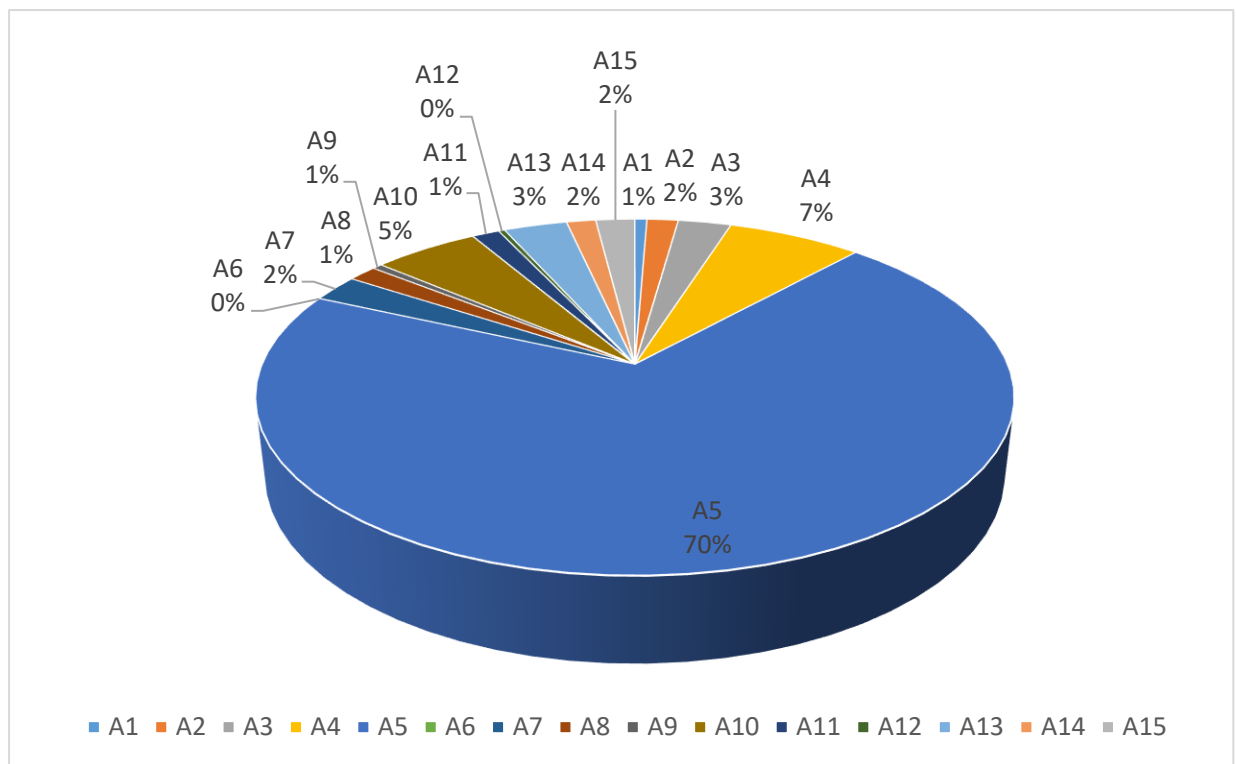
Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Se puede observar del Gráfico 5.4 y del Gráfico 5.5, la distribución de los costos de mantenimiento preventivo por aerogenerador se encuentran distribuidos de tal manera, que ningún aerogenerador tiene un costo asociado al mantenimiento preventivo mayor del 10 %, ni menor al 5 %.

5.3.7.2 Mantenimiento Correctivo

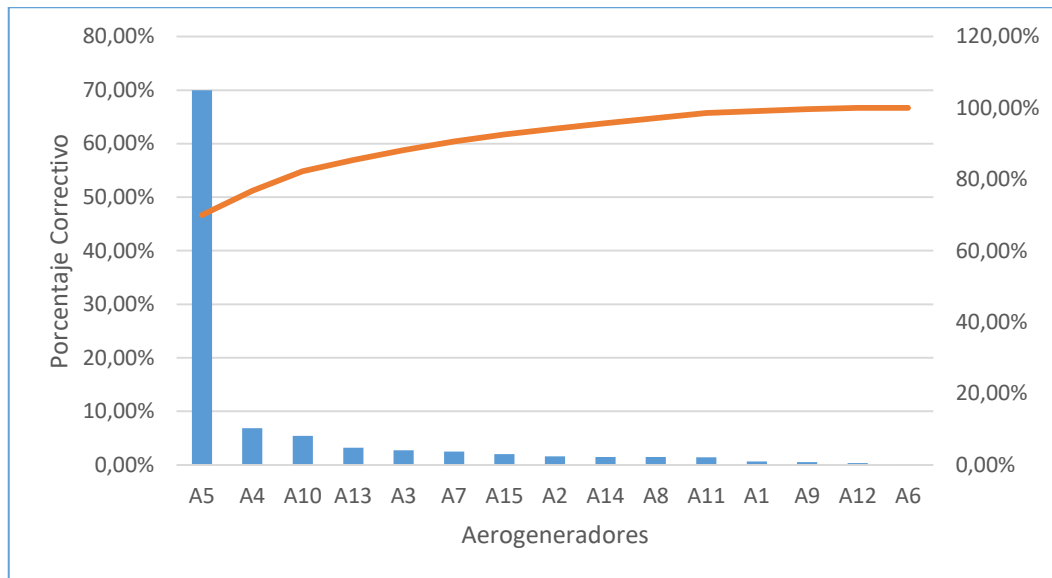
Ahora se observará la distribución de los costos por mantenimiento Correctivo en los 15 aerogeneradores.

Gráfico 5.6 Porcentaje de los costos de Mantenimiento correctivo Por Aerogenerador



Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Gráfico 5.7 Pareto de porcentaje de Costos de Mantenimiento Correctivo por Aerogenerador



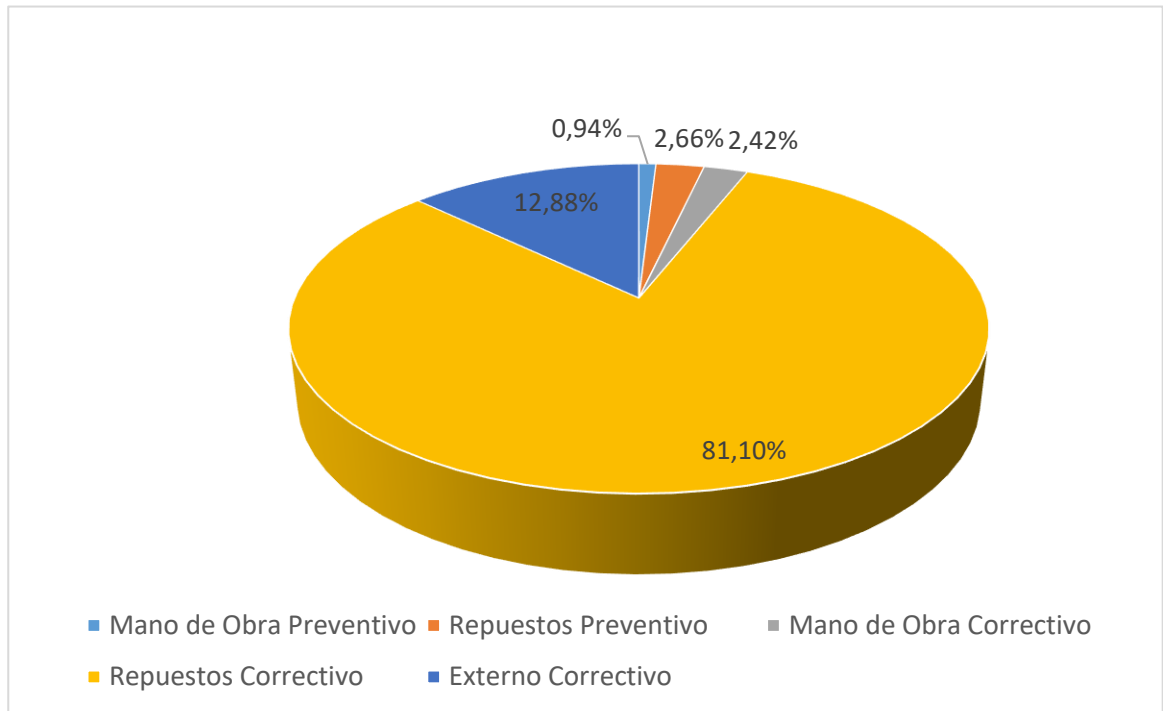
Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Contrario al mantenimiento preventivo, en el Gráfico 5.6 y el Gráfico 5.7, se puede observar, el aerogenerador número 5, representa un 70% del total de los costos por mantenimiento correctivo y representa los pocos vitales en el Pareto de dicho análisis.

5.3.7.3 Costos de Mantenimiento Aerogenerador número 5

Al ser el aerogenerador número 5, en el que se ha tenido que incurrir mayores gastos de mantenimiento, se procederá a describir el desglose de dichos costos.

Gráfico 5.8 Distribución de Costos de Mantenimiento Aerogenerador 5



Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Del gráfico anterior se puede observar que el alto costo de mantenimiento que ha tenido el aerogenerador número 5, se deben a costos por mantenimiento correctivo, y más específicamente a la compra de repuestos para la aplicación de este mismo tipo de mantenimiento.

5.3.1 Índices de Mantenimiento

El software MP calcula los índices de mantenimiento Para cada unidad aerogeneradora, los cuales corresponden al tiempo medio entre fallas (TMEF), tiempo medio para reparación (TMPR) y la confiabilidad de cada uno.

En la siguiente tabla se muestran estos índices de mantenimiento, así como la probabilidad de fallo de cada uno para los años 2014, 2015 y 2016.

Tabla 5.5 Índices de Mantenimiento de los Aerogeneradores

Aerogenerador	2014			2015			2016		
	TMEF	Confiabilidad	Prob. de Fallo	TMEF	Confiabilidad	Prob. de Fallo	TMEF	Confiabilidad	Prob. de Fallo
AE01	8760,00	3,70%	96,30%	11680,00	8,44%	91,56%	5856,00	0,72%	99,28%
AE02	0,00	100,00%	0,00%	5353,33	0,45%	99,55%	3660,00	0,04%	99,96%
AE03	0,00	100,00%	0,00%	1251,43	0,00%	100,00%	0,00	100,00%	0,00%
AE04	1752,00	0,00%	100,00%	4380,00	0,14%	99,86%	8784,00	3,73%	96,27%
AE05	4380,00	0,14%	99,86%	8760,00	3,70%	96,30%	7320,00	1,93%	98,07%
AE06	2190,00	0,00%	100,00%	0,00	100,00%	0,00%	4392,00	0,14%	99,86%
AE07	2190,00	0,00%	100,00%	2920,00	0,01%	99,99%	8784,00	3,73%	96,27%
AE08	8760,00	3,70%	96,30%	7300,00	1,91%	98,09%	5124,00	0,36%	99,64%
AE09	8760,00	3,70%	96,30%	4380,00	0,14%	99,86%	10248,00	5,97%	94,03%
AE10	2920,00	0,01%	99,99%	7300,00	1,91%	98,09%	17568,00	19,32%	80,68%
AE11	2190,00	0,00%	100,00%	5475,00	0,51%	99,49%	10980,00	7,21%	92,79%
AE12	0,00	100,00%	0,00%	4380,00	0,14%	99,86%	4392,00	0,14%	99,86%
AE13	8760,00	3,70%	96,30%	17520,00	19,24%	80,76%	13176,00	11,17%	88,83%
AE14	13140,00	11,10%	88,90%	3285,00	0,02%	99,98%	2352,85	0,00%	100,00%
AE15	0,00	100,00%	0,00%	7300,00	1,91%	98,09%	13176,00	11,17%	88,83%

Fuente: 6.2.1 MPsoftware

CAPÍTULO 6: Red Neuronal Artificial del Sistema Hidráulico

Como se mencionó en la sección 4.2 , el Ing. Bogantes, determinó los componentes críticos de los aerogeneradores con base a los costos de mantenimiento y los tiempos de reparación de cada sistema. Por lo que los componentes críticos seleccionados fueron: el generador, caja multiplicadora, rotor y sistema hidráulico.

En esta misma sección se puede observar que el sistema hidráulico, dentro de los componentes críticos es el menos representativo de los cuatro. Lo ideal sería iniciar con el desarrollo de la red neuronal para los sistemas más representativos de los aerogeneradores del PELS, sin embargo, las redes neuronales propuestas para el generador, la caja multiplicadora y el rotor, tienen como variables de entradas las señales del análisis de vibraciones, cuyas señales, como fue mencionado por Bogantes (2016), no se pueden obtener mediante el sistema de adquisición de datos actual, ya que representa un alto costo anual para poder obtener únicamente dos informes al año.

Es por esta razón que se decide iniciar con la programación de la red neuronal artificial del sistema hidráulico, ya que este tiene como variables de entrada la edad calendario del sistema, la potencia generada, la temperatura y presión del mismo, los cuales son datos con los que se cuenta.

En este capítulo se describirán los aspectos necesarios para el desarrollo, programación, entrenamiento y validación de la red neuronal artificial para el sistema hidráulico para el aerogenerador más representativo del Parque Eólico Los Santos.

6.1 Aerogenerador más Representativo del PELS

Con base en los resultados de la sección 5.3.7, se puede observar que el aerogenerador que ha representado mayores costos por mantenimiento correctivo es el aerogenerador número 5, al cual le siguen el número 4 y el 10, sin embargo, el número 5 corresponde al 48% de los costos de mantenimiento general y el 70% de los costos correctivos se relacionan con este mismo aerogenerador, por lo que este es seleccionado como el aerogenerador más representativo.

Al ser el aerogenerador número 5, el más representativo del PELS, se utilizarán los datos de este para la elaboración de la presente red neuronal artificial del sistema hidráulico.

Por lo que las siguientes secciones se desarrollan con los datos obtenidos del SGIPE y el MPsoftware referentes al aerogenerador número 5.

6.2 Variables de Condición a Monitorear del Sistema Hidráulico

Bogantes (2016), propuso la temperatura del grupo hidráulico y la presión como las variables de condición que se utilizarían en la red Neuronal artificial para el sistema hidráulico.

Para verificar que dichas variables sean las correctas para la predicción de la vida útil acumulada del sistema hidráulico, se observará la variación que las variables de condición relacionadas con el sistema hidráulico mantuvieron durante y después de un fallo, el cual se da a inicios del mes de agosto del 2014.

La falla consistía en una fuga excesiva de aceite del grupo hidráulico. Las variables que se analizan son la presión del grupo hidráulico, la Temperatura del Grupo Hidráulico, la presión del Freno de Yaw y el ángulo de Pitch.

En el siguiente gráfico se presenta la variación de las variables de condición para el periodo mencionado, la falla en el sistema hidráulico fue reparada el 7 de agosto de 2014, con lo que se deja el equipo funcionando correctamente.

Gráfico 6.1 Variación de las Variables de Condición ante una falla en el sistema



Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

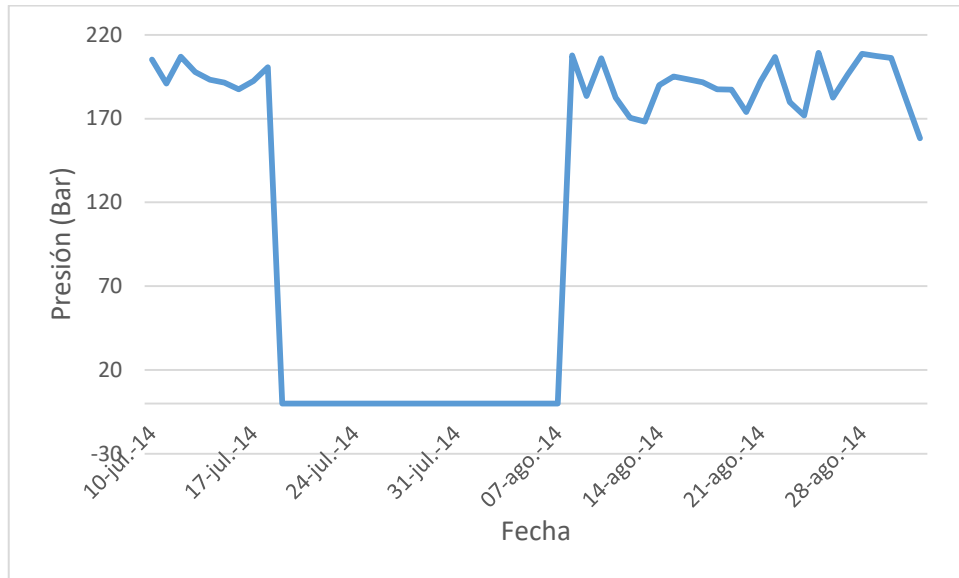
Seguidamente se mostrará y analizará cada una de las variables y como estas pueden utilizarse para la predicción de la vida útil acumulada del sistema hidráulico.

6.2.1 Presión Freno Yaw

El freno de yaw es el que se encarga de frenar la corona de orientación, la presión del freno de yaw es la presión del aceite que alimenta las 4 mordazas a través de una electroválvula.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de la presión de yaw ante la falla y después de ella.

Gráfico 6.2 Comportamiento Presión Freno Yaw



Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

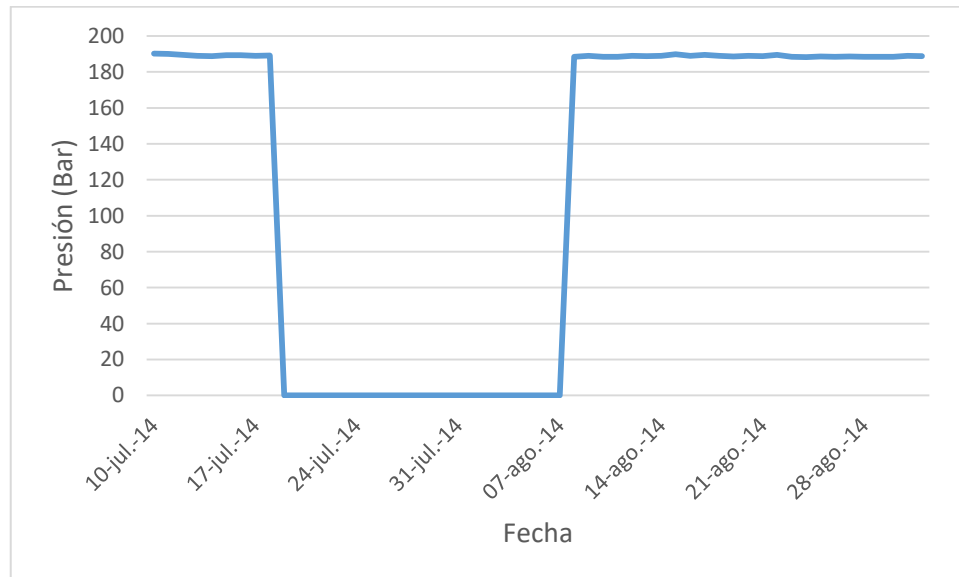
En el gráfico anterior se puede observar que la presión del circuito de Yaw se encuentra en valores muy bajos durante la falla, en comparación con los valores que presenta cuando el equipo se encuentra en su correcto funcionamiento.

6.2.2 Presión Grupo Hidráulico

El grupo hidráulico es la unidad de potencia que se encarga de suministrar la potencia hidráulica a los demás componentes que lo requieren (cilindro del pitch, sistema de freno de emergencia, freno de yaw). Es por esto que se puede considerar como uno de los elementos principales del sistema hidráulico, ya que un fallo en este puede traducirse en un fallo en la totalidad del sistema.

En el Gráfico 6., se muestra el comportamiento que mantuvo la presión del grupo hidráulico ante una falla y cuando el sistema vuelve a su correcto funcionamiento.

Gráfico 6.3 Comportamiento Presión Grupo Hidráulico



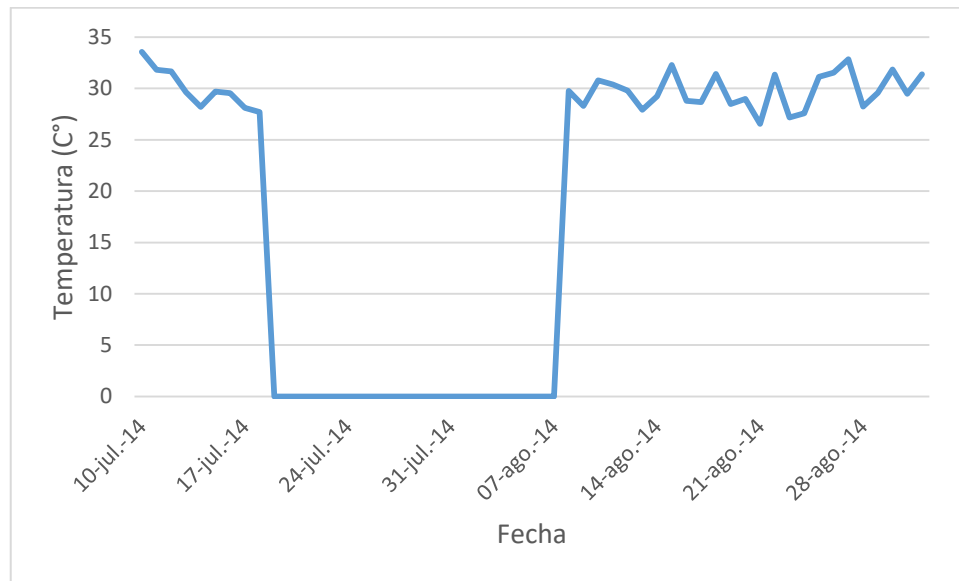
Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

En el grafico anterior se observa que realmente se da un cambio significativo en los valores de presión al presentarse una falla, si se comparan con los valores cuando el sistema opera correctamente.

6.2.3 Temperatura de aceite Grupo Hidráulico

En el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento de la temperatura del aceite del grupo hidráulico ante una falla y después de esta.

Gráfico 6.4 Comportamiento Temperatura Aceite Grupo Hidráulico



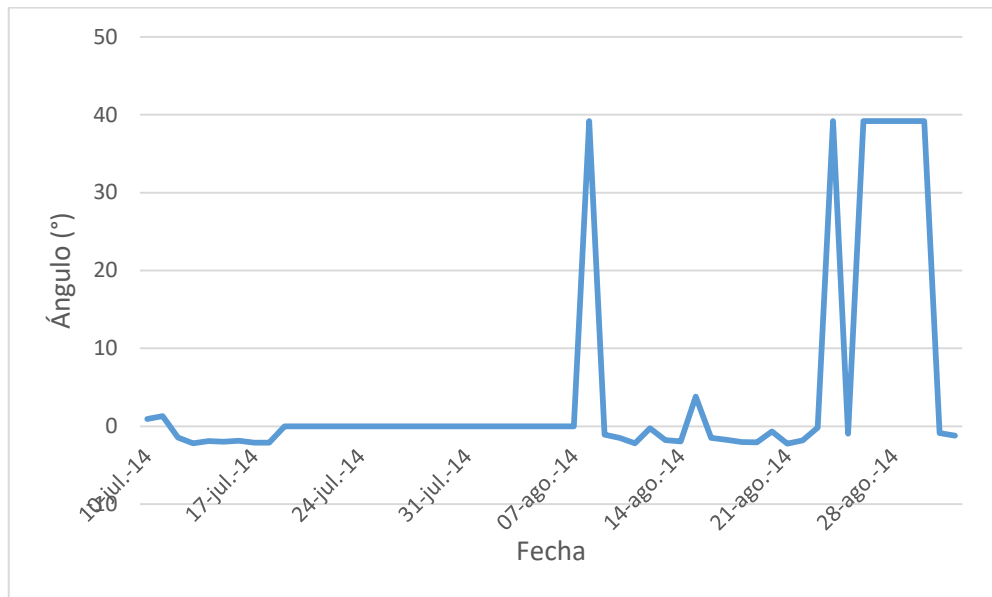
Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

En el gráfico anterior se observa que al encontrarse el sistema hidráulico en fallo, la lectura de la temperatura del aceite del grupo hidráulico se mantiene en 0, y una vez que la falla ha sido reparada, el valor de la lectura vuelve a los valores normales.

6.2.4 Angulo de Pitch

La variación en el ángulo de pitch se realiza mediante el sistema hidráulico, en el siguiente gráfico se puede observar el comportamiento del ángulo de pitch ante una falla y después de esta.

Gráfico 6.5 Comportamiento del Angulo de Pitch



Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

En el gráfico anterior se observa que el ángulo de pitch no muestra un cambio significativo antes y después de la falla, ya que los valores que se presentan cuando el sistema no funcionaba correctamente se repiten cuando el problema fue solucionado.

6.2.5 Variables de Condición seleccionadas

Al observar las variaciones que presentaron las diferentes variables de condición relacionadas con el sistema hidráulico, se decide utilizar la Presión del Grupo Hidráulico, la Temperatura de Aceite del Grupo Hidráulico, y la Presión de Freno de Yaw, ya que estas variables fueron las que reflejaron un cambio en el estado del sistema hidráulico al presentarse una falla.

6.3 Topología de la red Neuronal Para el Sistema Hidráulico

Con base en las variables determinadas en la sección anterior, se procederá a plantear la topología de la red Neuronal artificial para el sistema hidráulico del aerogenerador número 5 del Parque Eólico Los Santos.

6.3.1 Entradas de la Red Neuronal Artificial del Sistema Hidráulico

Como se determinó en la sección anterior, las variables de condición que se utilizarán en el sistema hidráulico son:

- a. Presión Grupo Hidráulico.
- b. Temperatura del Grupo Hidráulico.
- c. Presión Freno de Yaw.

Una vez definidas las variables de condición que se utilizarán en la predicción de la red neuronal artificial a implementar, se pueden definir las variables de entrada que se utilizarán. Estas deben abarcar el estado actual y anterior del sistema, además, se debe incluir el nodo de carga propuesto por Bogantes (2016) para poder simular un sistema bajo carga no constante. Es por esto que las entradas a la red neuronal del sistema hidráulico son las siguientes.

1. Edad del Sistema Hidráulico (t_i)
2. Edad del Sistema Hidráulico en el punto anterior de inspección (t_{i-1})
3. Presión del Grupo Hidráulico (PG_i)
4. Presión del Grupo Hidráulico en el punto anterior de inspección (PG_{i-1})
5. Temperatura del Grupo Hidráulico (Tg_i)
6. Temperatura del Grupo Hidráulico en el punto anterior de inspección (Tg_{i-1})
7. Presión Freno de Yaw (PY_i)
8. Presión Freno de Yaw en el punto anterior de inspección (PY_{i-1})
9. Potencia Total Generada (nodo de carga) (C)

6.3.2 Salida de la Red Neuronal Artificial del Sistema Hidráulico

La unidad de salida de esta red corresponderá al porcentaje de vida del componente en el punto de inspección, a este valor será asociado un porcentaje de error, correspondiente a la diferencia entre el valor esperado y el valor que determine la ANN.

El porcentaje de vida se expresará como P_i , dicho porcentaje se relaciona con la siguiente formula:

$$P_i = \frac{\text{Edad en el Punto Actual de Inspección}}{\text{Tiempo de falla del componente}} \times 100\% \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Este porcentaje de vida, depende de las condiciones monitoreadas al sistema hidráulico, y una vez que este alcance el 100%, la vida del mismo ha acabado.

Al tener la red neuronal del sistema hidráulico entrenada, podrá predecirse la vida remanente con base a la edad del componte y las condiciones que presente en este momento, por ejemplo, si se obtiene con la red neuronal un porcentaje de vida previsto de 80%, y la edad del componente en el punto de inspección es de 400 días, el tiempo de falla previsto será el cociente entre la edad calendario y el porcentaje de vida, lo que da como resultado un tiempo previsto de falla de 500 días.

Para calcular el porcentaje de vida previsto, se utilizan los parámetros de la distribución de falla para el sistema hidráulico, para realizar el cálculo de dichos parámetros, los fabricantes recurren a pruebas de fallas aceleradas, la determinación de dichos parámetros se salen de los alcances de este proyecto, por lo que se utilizarán parámetros consultados en la literatura.

La distribución Weibull es apropiada para describir los tiempos de fallas de los componentes de la turbina, en la siguiente tabla se muestran los parámetros para los componentes de un aerogenerador.

Tabla 6.1 Parámetros de la distribución Weibull para el tiempo de falla de los principales componentes.

Componente	Parámetros de la Distribución de Fallo Weibull		
	β	η	ρ
Rotor	1,8257	84678	0,9237
Caja Multiplicadora	1,2327	66122	0,9714
Sistema de Frenos	1,7459	82942	0,9667
Generador	0,7653	59252	0,8566
Sistema de Yaw	1,8665	58930	0,9911
Hidráulico – Sistema de Control	1,1027	78273	0,9553
Hidráulico – Control de Freno	1,6059	89672	0,9455
WTS	1,2639	71004	0,9039

Fuente: (Sunder, 2014)

Ya determinadas las entradas y salidas de la red, se procede con la topología de la misma, se plantea una red con una capa de entrada con 9 neuronas, dos capas ocultas, una de 3 neuronas y la segunda de dos neuronas y finalmente una capa de salida con una neurona.

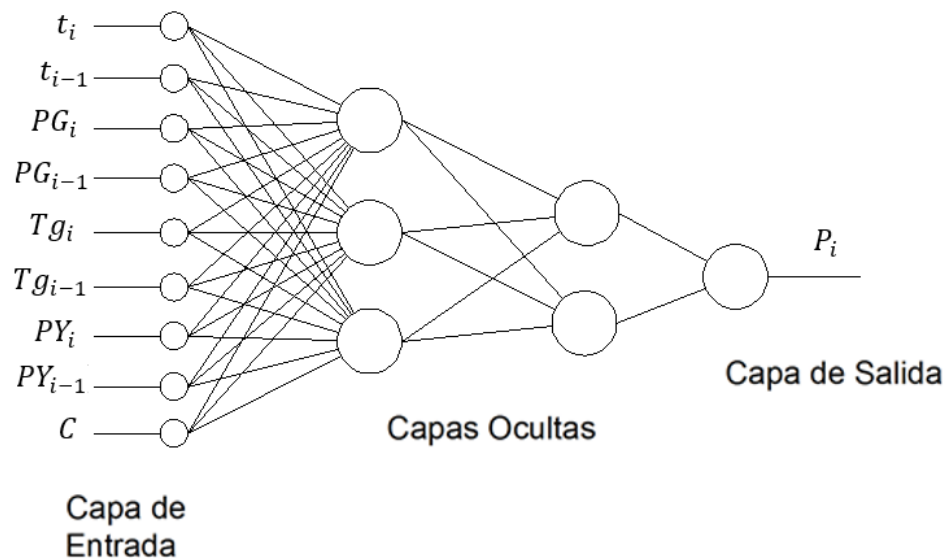


Figura 6.1 Topología de la ANN para el Sistema Hidráulico

Fuente: Elaboración Propia (Auto CAD 2016)

6.4 Programación de la Red Neuronal del Sistema Hidráulico

Una vez determinada la topología correspondiente al sistema hidráulico, se procederá con la programación de la red Neuronal artificial del Sistema Hidráulico para el aerogenerador número 5 del PELS.

Dicha programación se realizará utilizando el software Matlab. Dicho software cuenta con herramientas para la creación, entrenamiento y validación de redes neuronales artificiales, sin embargo, para hacer uso de esta se debe invertir en una licencia extra que incluye dichas herramientas, la cual es una licencia con la que COOPESANTOS no cuenta, por lo que para reducir los costos de la implementación de esta metodología, se procederá a programar los algoritmos de creación, entrenamiento y validación de la red neuronal artificial para el sistema hidráulico y dicha herramienta solamente se utilizará para corroborar los resultados que se obtengan con la programación.

6.4.1 Programación Algoritmo Red Neuronal Artificial

En la Figura 6.2 se muestra el código que se utilizó para la programación de la predicción de la vida útil del sistema hidráulico del aerogenerador mediante las redes neuronales. El código consiste en ir determinando la salida de las diferentes capas, hasta obtener la salida de la capa final, la cual corresponde al porcentaje de vida del sistema hidráulico.

```

1  function res = RedNeuronal(X)
2  load('pesos.mat');
3  res = Y(X,w1,w2,w3,u2,u3,u4);
4
5  end
6
7  function res = A2(i,X,w1,u2)
8
9  sumatoria=0;
10 for q=1:9
11
12     sumatoria = (X(q)*w1(q,i))+sumatoria;
13
14 end
15
16 aux1 = sumatoria+u2(i);
17
18 res = f(aux1);
19
20 end
21
22 function res = A3(i,X,w1,w2,u2,u3)
23
24 sumatoria=0;
25 for q=1:3
26
27     sumatoria = (A2(q,X,w1,u2)*w2(q,i))+sumatoria;
28
29 end
30
31 aux1 = sumatoria+u3(i);
32
33 res = f(aux1);
34
35 end
36
37 function res = Y(X,w1,w2,w3,u2,u3,u4)
38
39 sumatoria=0;
40 for q=1:2
41
42     sumatoria = (A3(q,X,w1,w2,u2,u3)*w3(q))+sumatoria;
43
44 end
45
46 aux1 = sumatoria+u4;
47
48 res = f(aux1);
49
50 end
51
52
53 function res = f(x)
54 res = 1 ./ (1 + exp(-x));
55 end

```

Figura 6.2 Programación Red Neuronal Artificial Sistema Hidráulico

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

6.4.2 Backpropagation

En la Figura 6.3 y la Figura 6.4 se muestra el código utilizado para la actualización de los diferentes pesos y umbrales de la red Neuronal Artificial, el cual se basa en el algoritmo de *backpropagation*, dicha función se utilizará en el entrenamiento de la red neuronal.

```
1 function BackPropagation(X,salida)
2     load('pesos.mat');
3     alfa = 0.75;
4     Y = [1 1];
5     d4 = [1 1];
6     for i=1
7         Y(i) = RedNeuronal(X);
8         d4(i)= delta4(Y(i),salida(i));
9     end
10
11     for j=1:9
12
13         for i=1:3
14             w1(j,i) = w1(j,i) - alfa*error(j,i,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4);
15             u2(i) = u2(i) - alfa*delta2(i,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4);
16         end
17     end
18
19     for j=1:3
20
21         for i=1:2
22
23             w2(j,i) = w2(j,i) - alfa*error2(j,i,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4);
24             u3(i) = u3(i) - alfa*delta3(i,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4);
25         end
26     end
27
28     for j=1:2
29
30         for i=1
31             w3(j,i) = w3(j,i) - alfa*error3(i,d4(i),X,w1,w2,w3,u2,u3,u4);
32             u4(i) = u4(i) - alfa*d4(i);
33         end
34     end
35
36     save pesos.mat w1 w2 w3 u2 u3 u4;
37 end
38
39 function res = delta4(Y,sal)
40
41     res = Y*(1-Y)*(Y-sal);
42
43 end
44
45 function res = delta3(k,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4)
46
47
48     a3=A3(k,X,w1,w2,u2,u3);
49     sumatoria=0;
50
51     for i=1
52
53         sumatoria = (w3(k,i)*d4(i)) + sumatoria;
54     end
55     res = a3*(1-a3)*sumatoria;
56
57
58 end
```

Figura 6.3 Parte 1 Función Backpropagation Sistema Hidráulico

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

```

59
60 function res = delta2(k,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4)
61
62     a2=A2(k,X,w1,u2);
63     sumatoria=0;
64     for p=1:2
65         sumatoria = (w2(k,p)*delta3(p,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4)+sumatoria);
66     end
67
68     res = a2*(1-a2)*sumatoria;
69
70
71 end
72
73 function res = error3(k,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4)
74
75     res = A3(k,X,w1,w2,u2,u3)*d4;
76
77 end
78
79 function res = error2(j,k,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4)
80
81     res = A2(j,X,w1,u2)*delta3(k,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4);
82
83 end
84
85 function res = error(j,k,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4)
86
87     res = X(j)*delta2(k,d4,X,w1,w2,w3,u2,u3,u4);
88
89 end
90
91
92 function res = A2(i,X,w1,u2)
93
94     sumatoria=0;
95     for q=1:9
96
97         sumatoria = (X(q)*w1(q,i))+sumatoria;
98
99     end
100
101     aux1 = sumatoria+u2(i);
102
103     res = f(aux1);
104
105 end
106
107 function res = A3(i,X,w1,w2,u2,u3)
108
109     sumatoria=0;
110     for q=1:3
111
112         sumatoria = (A2(q,X,w1,u2)*w2(q,i))+sumatoria;
113
114     end
115
116     aux1 = sumatoria+u3(i);
117
118     res = f(aux1);
119
120 end
121
122 function res = f(x)
123     res = 1 ./ (1 + exp(-x));
124 end

```

Figura 6.4 Parte 2 Función Backpropagation Sistema Hidráulico

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

6.4.3 Entrenamiento de la red

En la siguiente figura se muestra el código utilizado en la programación del entrenamiento de la red.

```
function EntrenamientoRedNeuronal(Entradas, Salida)
    [pn, ps]=mapminmax(Entradas);
    [tn, ts]=mapminmax(Salida);
    b=size(pn);
    p=[];
    k=[];
    matriz=[];
    e=1;
    while e>0.0005
        for j=1:(b(1)-1)
            x = [pn(j,1) pn(j,2) pn(j,3) pn(j,4) pn(j,5) pn(j,6) pn(j,7) pn(j,8) pn(j,9)];
            porcentajefalla=Salida(j,1);
            BackPropagation(x, porcentajefalla)
            y=RedNeuronal(x);
            k(j)=porcentajefalla;
            e=0.5*(y-k(j))^2;

            matriz(j)=e;
            p(j)=y;
        end
    end
    DesviacionEstandar=std(matriz);
    DesviacionEstandar
    Media=mean(matriz);
    Media
    plot(p, 'r')
    hold ('on')
    plot(Salida, 'b')
    legend('valores estimados', 'salidas deseadas')
    save DesvEst.mat DesviacionEstandar Media;
```

Figura 6.5 Código Entrenamiento Red Neuronal

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

6.4.4 Validación de la red

Seguidamente se muestra el código utilizado para la validación de la red neuronal artificial del sistema hidráulico.

```
function ValidacionRedNeuronal(Entradas, Salida)
    [pn, ps]=mapminmax(Entradas);
    [tn, ts]=mapminmax(Salida);
    u=pn;
    b=size(u);
    p=[];
    k=[];

    matriz=[];
    for j=1:(b(1)-1)
        x = [u(j,1) u(j,2) u(j,3) u(j,4) u(j,5) u(j,6) u(j,7) u(j,8) u(j,9)];
        porcentajefalla=tn(j,1);

        y=RedNeuronal(x);
        k(j)=porcentajefalla;
        e=0.5*(y-k(j))^2;
        matriz(j)=e;
        p(j)=y;
    end
    DesviacionEstandar=std(matriz);
    DesviacionEstandar
    Media=mean(matriz);
    Media
    plot(k, 'r')
    hold ('on')
    plot(p, 'b')

    legend('valores estimados', 'salidas deseadas')
```

Figura 6.6 Código para la Validación de la Red Neuronal

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

6.5 Entrenamiento de la Red Neuronal del Sistema Hidráulico

En la sección anterior, se mostró la programación necesaria para el entrenamiento de la red, seguidamente, se mostrarán los resultados obtenidos en dicho entrenamiento.

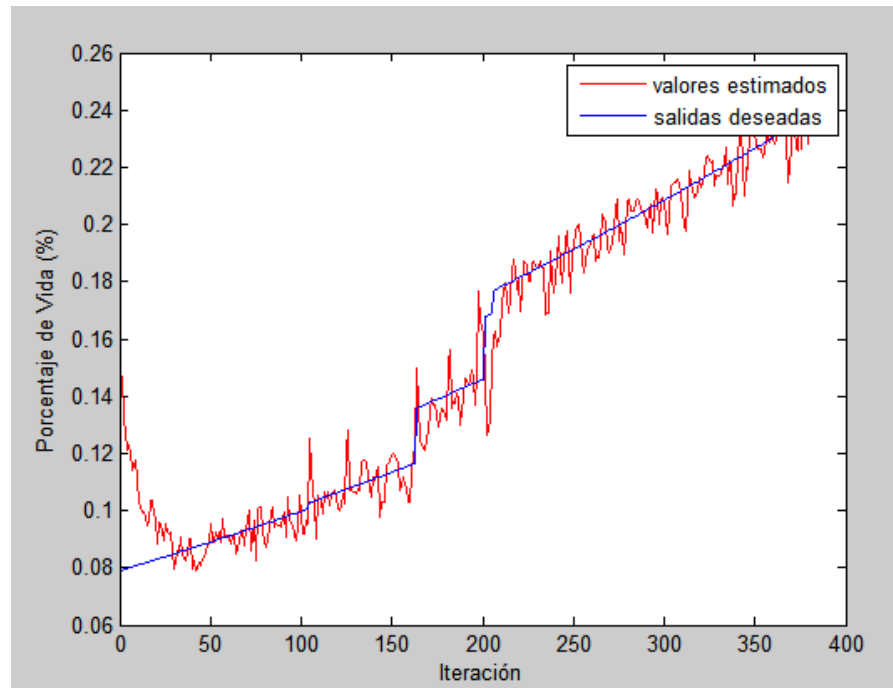
Para tener una mayor confiabilidad en el entrenamiento de la red, se realizó el mismo entrenamiento utilizando la herramienta para el entrenamiento de redes neuronales artificiales que incorpora Matlab para la validación de los resultados obtenidos.

Para el entrenamiento de la Red Neuronal Artificial se utilizó el historial de datos guardado por el sistema SGIPE, correspondiente al período de Noviembre del 2014, hasta septiembre del 2016, de estos datos se utilizó el 80% para el entrenamiento, como es recomendado por Chang, Hsieh & Chang (2010).

6.5.1 Resultado con programación manual

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de los datos obtenidos en el entrenamiento de la red neuronal artificial.

Gráfico 6.6 Resultado del Entrenamiento de la Red Neuronal del Sistema Hidráulico



Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

En la siguiente imagen se muestra la media y la desviación estándar del error asociado a los resultados obtenidos en el entrenamiento.

```
DesviacionEstandar =  
  
    1.9030e-04  
  
Media =  
  
    5.9932e-05
```

Figura 6.7 Media y desviación estándar del error

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

6.5.2 Resultados Utilizando Herramienta de Matlab

Matlab incorpora herramientas para la creación, entrenamiento y validación de redes neuronales artificiales, se hará uso de esta para realizar el desarrollo de la red neuronal del sistema hidráulico.

En la siguiente figura se muestra la pantalla que desplaza Matlab en el entrenamiento de las redes neuronales, en la parte superior de esta, se puede observar la topología de la Red Neuronal creada, y en la parte central se muestran los límites y los valores alcanzados durante el entrenamiento.

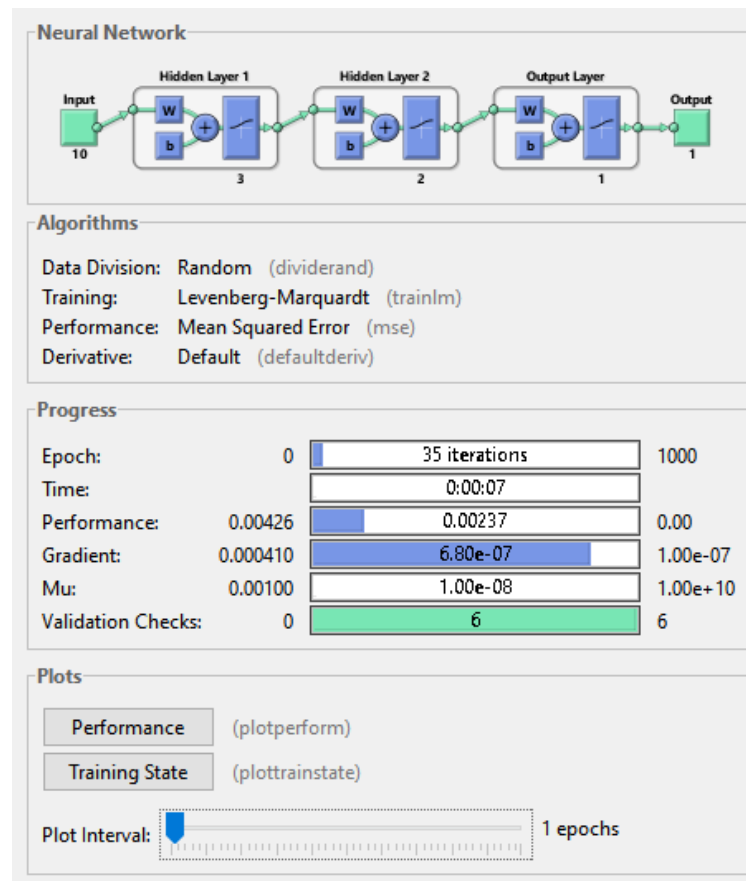


Figura 6.8 Entrenamiento Red Neuronal Artificial Sistema hidráulico

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

En la Figura 6.8 y la Figura 6.9, se muestra el comportamiento del error medio cuadrático en la fase de entrenamiento, validación y prueba que realiza Matlab.

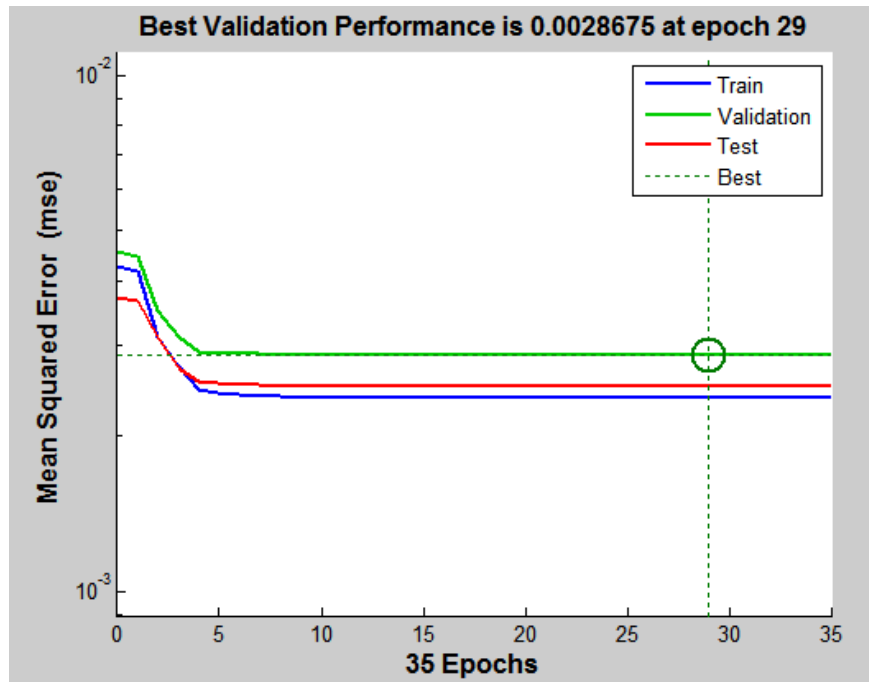


Figura 6.8 Comportamiento del Error Medio Cuadrático en las diferentes fases

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

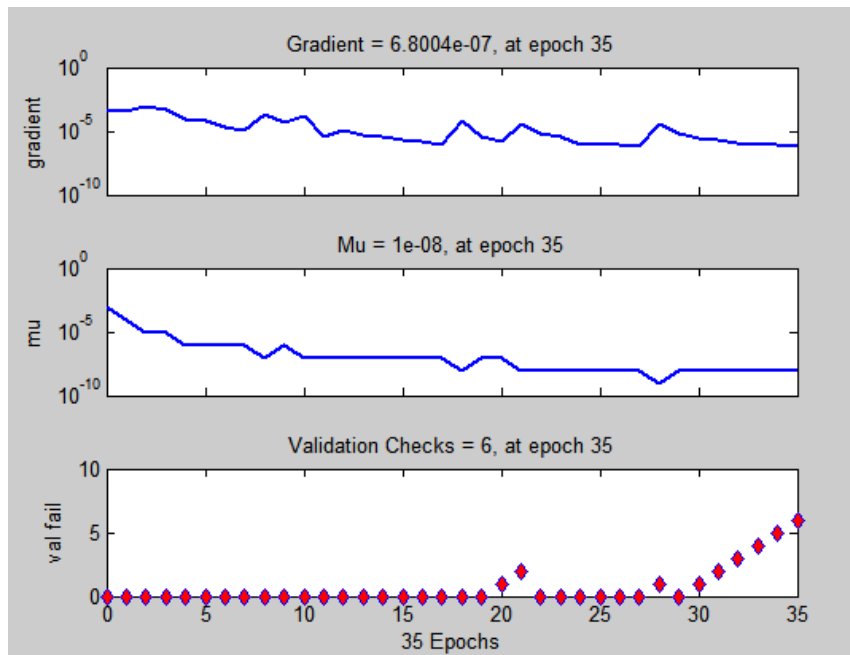


Figura 6.9 Comportamiento de los Parámetros en el Entrenamiento

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

Seguidamente, se muestra una gráfica en la cual se observan los valores estimados y esperados. Los Resultados obtenidos y esperados se encuentran muy cercanos, al igual que como se obtuvo con la programación del algoritmo, en la cual los datos obtenidos se empiezan a acercar a los esperados antes, en comparación con el resultado obtenido con la herramienta de Matlab.

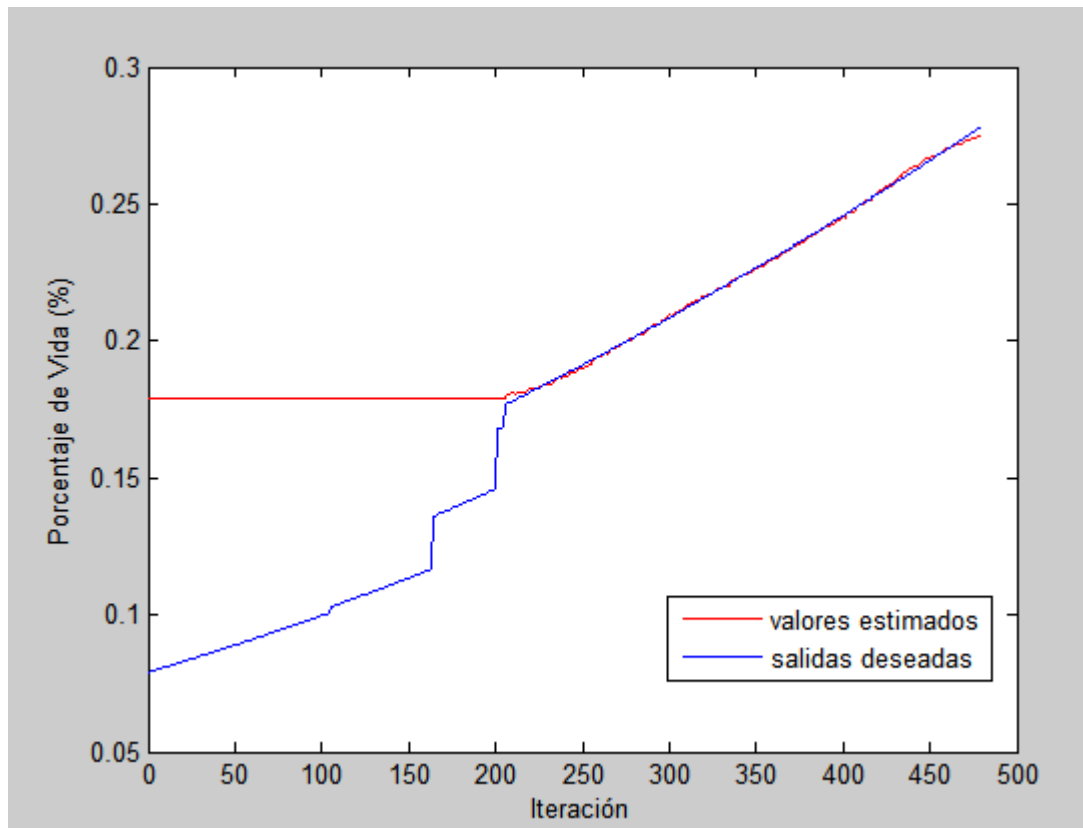


Figura 6.9 Valores Estimados y deseados en el entrenamiento de la Red Neuronal

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

El error cuadrático medio obtenido en el entrenamiento de la red se muestra en la siguiente imagen.

```
>> mse=mean(d)

mse =

    0.0024
```

Figura 6.10 Error medio Cuadrático obtenido en el entrenamiento de la red

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

Se puede observar que el error cuadrático medio obtenido con la programación del algoritmo es menor que el que se obtiene al utilizar la herramienta de Matlab para el entrenamiento de la red.

6.6 Validación de la Red Neuronal del Sistema Hidráulico

Con la red Neuronal Artificial programada y entrenada, se procedió a la validación de los resultados. Para la validación de la Red Neuronal Artificial se utilizó el 20% de los datos, como es recomendado por Chang, Hsieh & Chang (2010).

Al utilizar la programación realizada para la validación de la red neuronal del sistema hidráulico, se obtuvieron los siguientes resultados.

En la Figura 6.11 y la

Figura 6.12, se observa el comportamiento de los valores obtenidos y los valores deseados en la validación de la red neuronal artificial, así como la media y la desviación estándar del error.

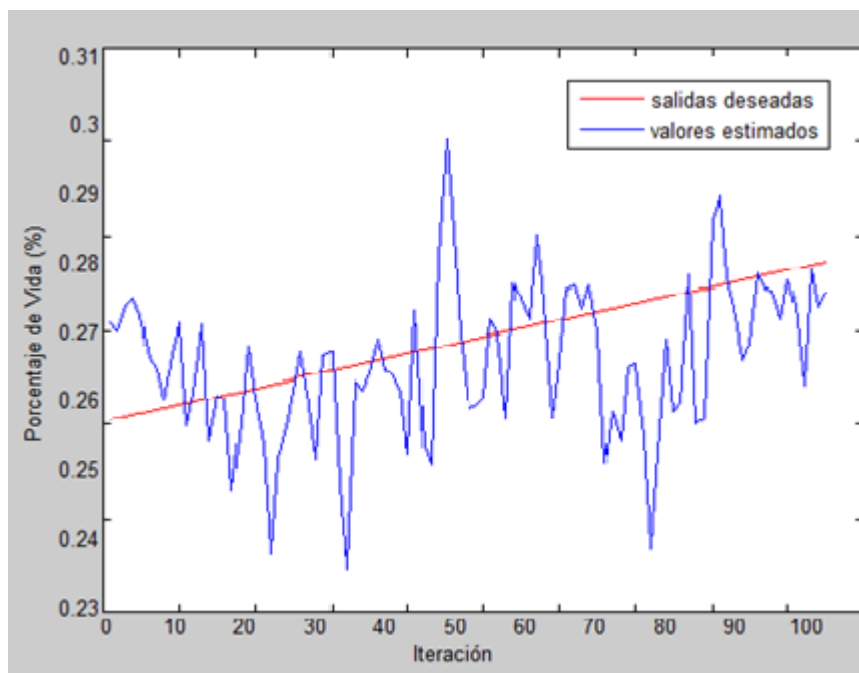


Figura 6.11 Comportamiento de la salida esperada y salida deseada en la validación de la red

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

DesviacionEstandar =

1.7849e-04

Media =

2.0407e-04

Figura 6.12 Media y desviación estándar del error obtenido en la validación de la red.

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

El error cuadrático medio obtenido en la etapa de validación mediante la programación del algoritmo es menor que el menor valor obtenido en la validación mediante la herramienta incorporada por Matlab, el cual fue de $2,8675e-3$.

En este punto del proceso de creación de la red neuronal del sistema hidráulico para el aerogenerador número 5, se tiene la red neuronal, entrenada y validada, por lo que se dice que está se encuentra lista para utilizarse en la predicción de vida útil acumulada del sistema hidráulico de dicho aerogenerador. Se recomienda mantener un período de prueba, en el que se ejecute la red neuronal y en el que se determinen los valores umbrales que se utilizarán para tomar las decisiones de las acciones de mantenimiento que se deban realizar.

CAPÍTULO 7: Aspectos Económicos

En este capítulo se presentarán los costos asociados a la creación de la red neuronal artificial del sistema hidráulico del aerogenerador número 5 del PELS. Como este modelo está en su etapa de construcción, solamente se tomarán en cuenta los costos relacionados en dicho proceso.

Los costos que se relacionan con la etapa de la creación de la red neuronal del sistema hidráulico, toman en cuenta los precio unitario de la hora profesional, el cual fue tomado de la página oficial del colegio federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, publicado en la Gaceta en enero de 2015, y el costo de la licencia de Matlab corresponde a la licencia estándar, la cual es suficiente para la aplicación que se piensa desarrollar, el precio de esta fue tomado de la página oficial de MathWorks.

En la siguiente tabla se describen los costos asociados a la construcción, entrenamiento y validación de la red neuronal artificial, los cuales corresponden a costos asociados a mano de obra profesional y al costo si se debe adquirir la licencia del software Matlab.

Tabla 7.1 Costos Asociados a la creación de la red Neuronal del Sistema hidráulico

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Total
Horas Profesionales Estudiante	640 h	¢24.273.00	¢15 534 720
Licencia Matlab	1 unidad	¢1 305 211,77	¢1 305 211,77
Total			¢16 839 931,8

Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

El costo total asociado a la construcción de la red neuronal descrita en los capítulos anteriores es de ¢16 839 931,8, sin embargo, este es un costo representativo, ya que el 92,25% de este costo corresponde al aporte profesional que realiza el estudiante y como ya se contaba con el software Matlab, no se debió invertir en la obtención de este.

COOPESANTOS recibirá la red neuronal del sistema hidráulico lista para su implementación, la cual será el primer producto tangible del proceso para iniciar con la metodología basada en redes neuronales artificiales para la predicción de la vida útil de los aerogeneradores G52/850, con lo cual se espera migrar hacia un mantenimiento basado en la condición.

Es importante mencionar además, que aunque aún no se ha podido percibir ningún beneficio económico, con este proyecto y el realizado por Loria (2016) y Bogantes (2016) se ha logrado cambiar paradigmas y motivar a la cooperativa COOPESANTOS, a cambiar la forma de pensar en cuanto al mantenimiento básico, apostando por la investigación y el desarrollo de nuevos métodos que les permita ser más eficientes, tener una mayor confiabilidad, y tener una menor dependencia del fabricante, a la vez que logré reducir los costos de mantenimiento al pasar de un mantenimiento preventivo, a un mantenimiento basado en la condición, lo que se espera, pueda reflejarse en un menor costo de la energía que COOPESANTOS distribuye.

Gracias a esto, COOPESANTOS ha decidido dar seguimiento a este proyecto con la ayuda de más estudiantes que obtén por su grado de Licenciatura en Ingeniería, con lo que se espera lograr el 100% de la implementación en el Parque Eólico Los Santos.

Como el modelo aún no ha sido implementado, no es posible realizar el cálculo del ahorro que se obtendrá con este, ni el tiempo del retorno de la inversión, sin embargo, como es mencionado por Loria (2016), el cálculo del tiempo para la recuperación de la inversión puede ser calculado en función del ahorro obtenido al aplicar este modelo en lugar de la política de mantenimiento preventivo.

Con base a lo anterior, se realiza un aproximado del ahorro que puede ser percibido, utilizando los costos establecidos por Tian, Jim, Wu & Ding (2010), para el caso de 5 unidades aero-generadoras, extrapolando dicho valor para el caso de 15 unidades, obteniendo un ahorro de \$ 768,99 diarios.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Del presente proyecto se concluye lo siguiente:

1. Se determinó el funcionamiento del sistema hidráulico de los aerogeneradores G52/850 y el procesamiento de las señales analógicas, las cuales son obtenidas y analizadas mediante el software SGIPE.
2. Se determinó el estado actual del grupo hidráulico, sistema de freno, sistema de pitch y sistema de yaw del aerogenerador número 5 del PELS, encontrándose todos los componentes en las condiciones óptimas de funcionamiento.
3. Se determinaron las variables que representan mejor la vida útil del sistema hidráulico, dando como resultado, la presión del grupo hidráulico, la temperatura de aceite del grupo hidráulico y la presión del freno de yaw, dichas variables se utilizaron en la entrada de la red neuronal desarrollada.
4. Se realizó la creación, entrenamiento y validación de la Red Neuronal del Sistema hidráulico del aerogenerador número 5, quedando está lista para su implementación.
5. La construcción de la Red Neuronal del Sistema Hidráulico, tiene un costo asociado de ¢16 839 931,8, sin embargo, dicho costo es representativo, ya que el 92.25% de éste, corresponde al trabajo aportado por el estudiante, y el otro 7.75% restante, corresponde al software Matlab, con el cual ya se cuenta. Finalmente, el ahorro estimado al implementar la totalidad del modelo es de \$ 768,99 diarios.

Recomendaciones

Respecto al presente proyecto se recomienda lo siguiente:

1. Mantener la recolección de los datos de falla y suspensión tanto para el sistema hidráulico, como para los demás componentes del aerogenerador.
2. Realizar la recolección de datos mensualmente, para evitar la pérdida de los valores que se encuentran en la base de datos existentes.
3. Implementar el sistema de monitoreo de vibraciones en línea propuesto por Bogantes o un sistema equivalente para poder continuar con la creación de las redes neuronales para los componentes críticos restantes.
4. Mantener un período de prueba de la red neuronal creada de al menos seis meses, antes de iniciar a tomar decisiones de mantenimiento con base a los resultados que se obtendrán de esta.
5. En el período de prueba determinar los Valores umbrales para la toma de decisiones de las acciones de mantenimiento con base en los resultados que se obtengan de la red Neuronal.
6. Si se desea implementar este tipo de Red Neuronal en una empresa que no posea el software Matlab, se puede utilizar herramientas similares como el software Octave.
7. Se recomienda continuar con el seguimiento a este tipo de proyectos utilizando la colaboración de estudiantes que optan por su grado de licenciatura en ingeniería y que se encuentran deseosos de contribuir al desarrollo de las energías renovables.

Anexos

Anexo 1: Procedimiento para crear redes neuronales personalizadas en Matlab

En este apartado se describirá paso a paso los comandos que se deben emplear en la creación, entrenamiento y validación de una red neuronal artificial utilizando una de las herramientas que Matlab proporciona para esto.

A manera ilustrativa se realizará la creación de una red neuronal que relacione las variables presentes en la siguiente tabla.

Tabla A1.1 Datos para el entrenamiento y Validación de la Red

N°	P		T
	Var1	Var2	Var3
1	107,1	113,5	112,7
2	113,5	112,7	114,7
3	112,7	114,7	123,4
4	114,7	123,4	123,6
5	123,4	123,6	116,3
6	123,6	116,3	118,5
7	116,3	118,5	119,8
8	118,5	119,8	120,3
9	119,8	120,3	127,4
10	120,3	127,4	125,1
11	127,4	125,1	127,6
12	125,1	127,6	129,0
13	127,6	129,0	124,6
14	129,0	124,6	134,1
15	124,6	134,1	146,5
16	134,1	146,5	171,2
17	146,5	171,2	178,6
18	171,2	178,6	172,2
19	178,6	172,2	171,5
20	172,2	171,5	163,6

Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Primero se inicia reservando un espacio de memoria en el que se colocará el objeto tipo red neuronal, por lo que se introduce el siguiente comando.

```
net = network;
```

Seguidamente creamos una matriz con las entradas y otro con las salidas de la red.

```
X = [107.1 113.5 112.7 114.7 123.4 123.6 116.3 118.5 119.8 120.3 127.4 125.1 127.6  
129.0 124.6 134.1 146.5 171.2 178.6 172.2; 113.5 112.7 114.7 123.4 123.6 116.3  
118.5 119.8 120.3 127.4 125.1 127.6 129.0 124.6 134.1 146.5 171.2 178.6 172.2  
171.5];
```

```
T = [112.7 114.7 123.4 123.6 116.3 118.5 119.8 120.3 127.4 125.1 127.6 129.0 124.6  
134.1 146.5 171.2 178.6 172.2 171.5 163.6];
```

Para la elaboración de este ejemplo se realizará una red de dos capas, con 7 neuronas en la capa oculta y una en la capa de salida.

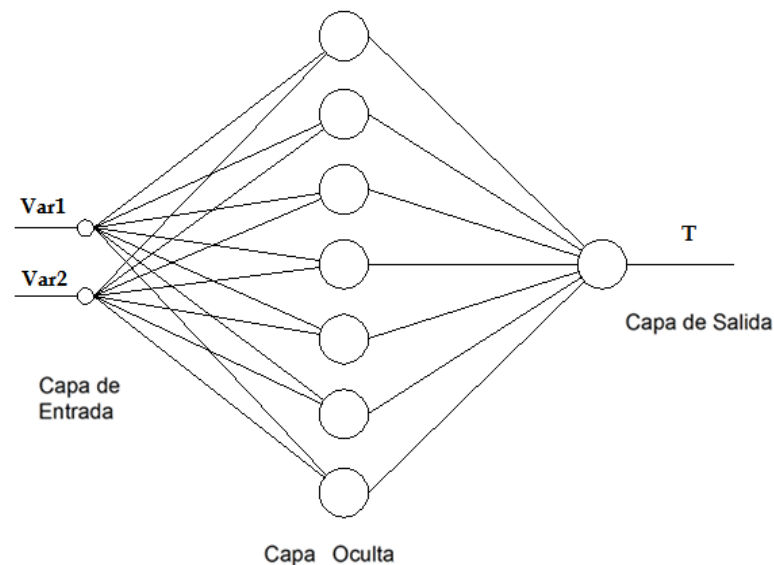


Figura A.0.1.1 Topología de la Red Neuronal a Desarrollar

Fuente: Elaboración Propia (Auto CAD 2016)

Para crear esta configuración se introduce el siguiente comando.

```
net=newff(X,T,7);
```

Se define el número de vectores de entrada:

```
net.numInputs = 1;
```

Ahora, se define el número de capas y el número de neuronas por capa:

```
net.numLayers = 2;
```

```
net.layers{1}.size = 7;
```

```
net.layers{2}.size = 1;
```

Se debe especificar la conexión de las diferentes capas:

```
net.inputConnect(1,1) = 1;
```

```
net.layerConnect(2, 1) = 1;
```

```
net.outputConnect(1) = 0;
```

```
net.outputConnect(2) = 1;
```

Existen diferentes funciones de activación, se debe especificar la función de activación que se desea utilizar por capa.

```
net.layers{1}.transferFcn = 'tansig';
```

```
net.layers{2}.transferFcn = 'purelin';
```

Para poder observar como la estructura que posee la red hasta el momento se utiliza el siguiente comando:

```
view(net)
```

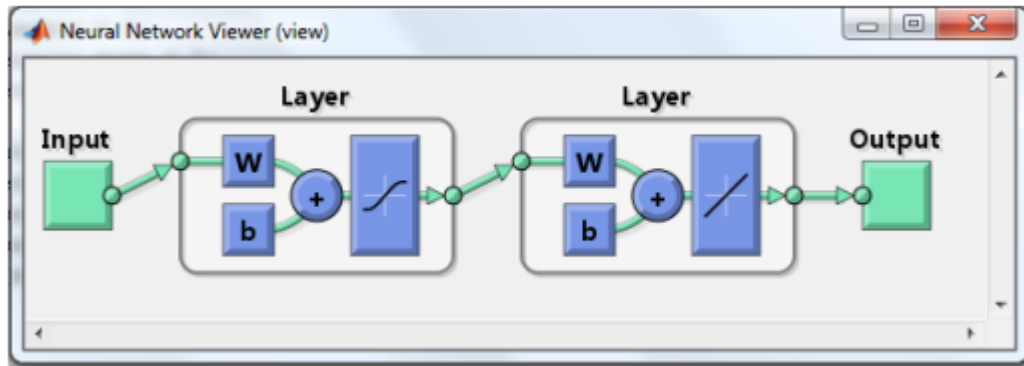


Figura A1.2 Estructura de La Red Neuronal

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

También se debe especificar la conexión de los diferentes pesos y umbrales de las diferentes capas.

```
net.biasConnect(1) = 1;
```

```
net.biasConnect(2) = 1;
```

Se decide un procedimiento para inicializar los pesos y umbrales:

```
net.initFcn = 'initlay';
```

Seguidamente configuraremos como función de control el error medio cuadrático y como función de entrenamiento el algoritmo Levenberg-Marquardt Backpropagation:

```
net.performFcn = 'mse';
```

```
net.trainFcn = 'trainlm';
```

Se especifica la cantidad de datos con los que se desea que se realice el entrenamiento, la validación y la prueba de la red, así como establecer la función de gráficos para observar el estado de convergencia durante el entrenamiento de la red.

```
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
```

```
net.divideParam.valRatio = 15/100;
```

```
net.divideParam.testRatio = 15/100;
```

```
net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate'};
```

Inicializamos la red para que los pesos y umbrales tomen un valor de inicio.

```
net = init(net);
```

Para normalizar las entradas y salidas se utiliza el siguiente código.

```
net.inputs{1}.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
```

Establecemos además el número de iteraciones, la tasa de aprendizaje y el factor momento.

```
net.trainParam.epochs=50;
```

```
net.trainParam.lr=0.06;
```

```
net.trainParam.mc=0.9;
```

Se inicia el entrenamiento con el siguiente comando.

```
[net,tr] = train(net,X,T);
```

Simulamos la red entrenada.

```
Y = sim(net,X);
```

Se grafican los resultados

```
plot(Y,'o')
```

```
hold
```

```
plot(T,'*')
```

```
legend('valores estimados','salidas deseadas',)
```

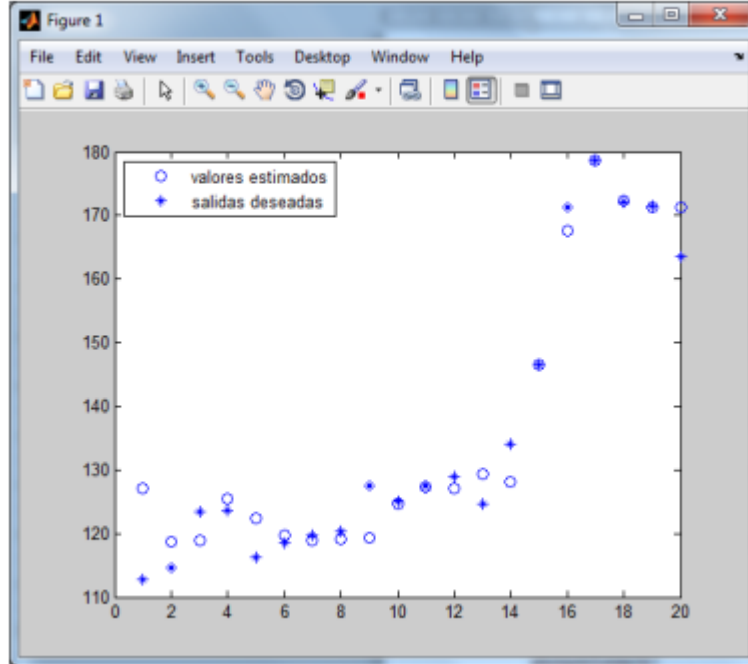


Figura A1.3 Valores Estimados y deseados de la red neuronal

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

El resultado de estos datos variará ligeramente, de acuerdo al valor inicial de los pesos.

Con el siguiente comando se muestra el funcionamiento de la red en las diferentes etapas.

plotperform(tr)

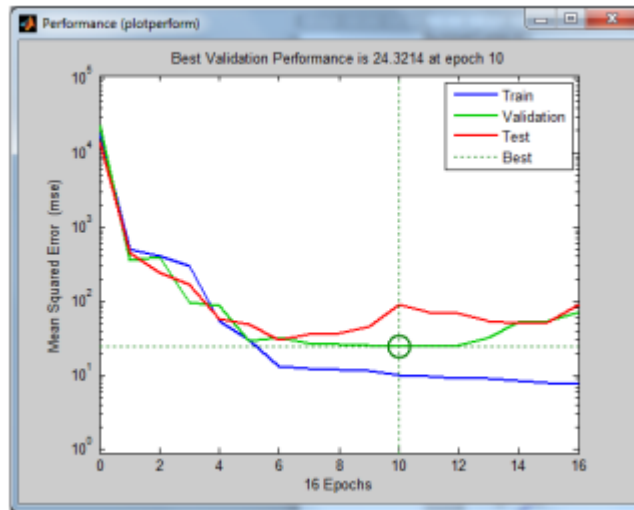


Figura A1.4 Funcionamiento de la red en las diferentes etapas

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

Y para observar el ajuste entre los valores estimados y predichos tecleamos.

plotregression(Y,T)

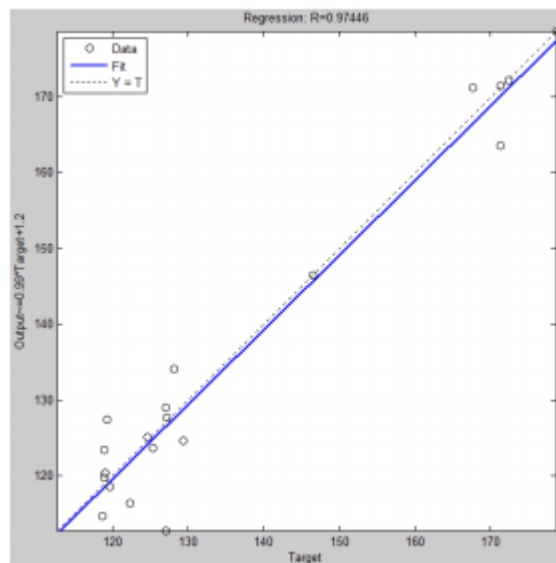


Figura A1.5 Valores Estimados versus Deseados

Fuente: Elaboración Propia (MATLAB R2015a)

Anexo 2: Características Técnicas del Aerogenerador Gamesa G52/850

En esta sección se detallan las características técnicas del aerogenerador Gamesa G52/850, el cual corresponde a los aerogeneradores instalados en el PELS, en la Gráfica presente, se observa la capacidad de esta en función de la velocidad del viento.

Rotor	
Diámetro	52 m
Área de barrido	2.124 m ²
Velocidad de giro	Variable 14,6 - 30,8 rpm. torres 55 v 65m Variable 16,2 - 30,8 rpm, torre 44m
Sentido de giro	Agujas del reloj (vista frontal)
Peso (Incl. Buje)	Aprox. 10 T
Peso (Incl. Buje y Nacelle)	Aprox. 33 T

Palas	
Número de palas	3
Longitud	25,3 m
Perfil	NACA 63.XXX + FFA-W3
Material	Fibra de vidrio preimpregnada de resina epoxy
Peso pala completa	1.900 kg

Torre tubular		
Tipo modular	Altura	Peso
2 secciones	44 m	45 T
2 secciones	49 m	53 T
3 secciones	55 m	62 T
3 secciones	65 m	79 T
3 secciones	74 m	91 T

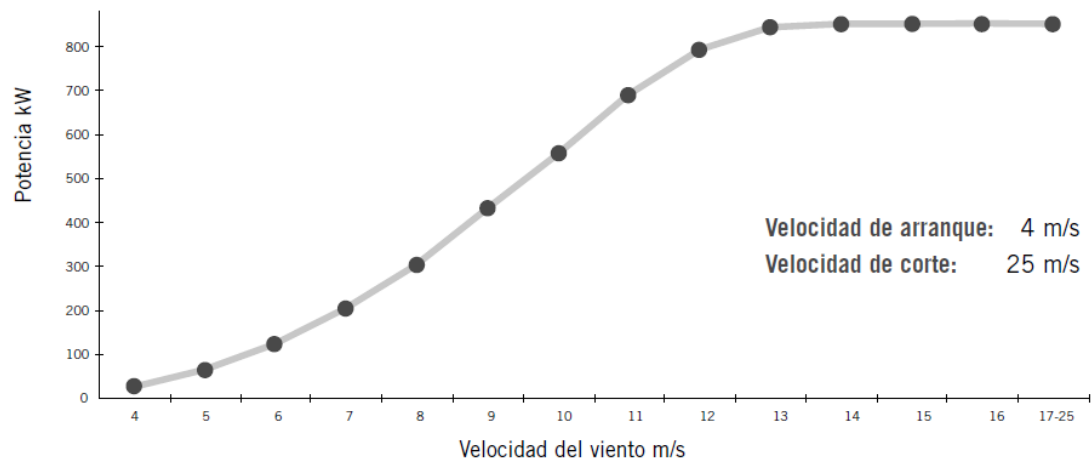
Multiplicadora	
Tipo	1 etapa planetaria/ 2 etapas de ejes paralelos
Ratio	1:61,74 (50 Hz) 1:74,5 (60 Hz)
Refrigeración	Bomba de aceite con radiador de aceite
Calentamiento aceite	1,5 kW

Generador 850 kW	
Tipo	Generador doblemente alimentado
Potencia nominal	850 kW
Tensión	690 V ac
Frecuencia	50 Hz / 60 Hz
Clase de protección	IP 54
Número de polos	4
Velocidad de giro	900:1.900 rpm (nominal 1.620 rpm) (50 Hz)
Intensidad nominal Estator	670 A @ 690 V
Factor de potencia (standard)	0.95 CAP - 0.95 IND a cargas parciales v 1 a potencia nominal. *
Factor de potencia (opcional)	0.95 CAP - 0.95 IND en todo el rango de potencias. *

* Factor de potencia en bornas de salida del generador en el lado de baja tensión antes de la entrada del transformador.

Figura A2.1 Características del aerogenerador Gamesa G52-850 kW

Fuente: Gamesa (2007)



Gráfica A2.1 Curva de Potencia Aerogenerador Gamesa G52-850 kW

Fuente: Gamesa (2007)

Anexo 3: Rutinas de Mantenimiento Preventivo Realizadas en el PELS

Las rutinas de mantenimiento que se realizan actualmente en el PELS, consisten principalmente, en las recomendaciones realizadas por el fabricante, a continuación se muestran las rutinas de mantenimiento que se realizan a 6 meses y de manera anual.

Tabla A3.1 Principales labores de Mantenimiento del plan de 6 meses

Tareas
Inspección auditiva y visual de palas
Inspección visual de puerta de torre
Comprobación de nivel de aceite
Comprobación de funcionamiento de botones de emergencia
Inspección visual Puerta Nacelle y barra de seguridad
Inspección visual Polipasto
Limpieza de cuerpo de anillos rozantes
Comprobación de desgaste y asiento de escobillas de fase y tierra
Inspección de amortiguadores de Multiplicadora
Inspección visual de las pastillas de freno
Inspección para detectar fugas en el sistema hidráulico
Comprobación ausencia partículas metálicas depósito de aceite Multiplicadora
Inspección visual de la barra de seguridad del techo de la NACELLE
Lubricación rodamiento de pala
Engrase de caja de rodamientos de Pitch
Comprobar nivel aceite del Sistema Hidráulico
Comprobar funcionamiento de válvula seguridad del Sistema Hidráulico
Lubricación de Corona
Inspección Auditiva del sistema de Yaw
Lubricación de Rodamientos Principales
Engrase de rodamientos generador
Inspección Auditiva de la caja Multiplicadora
Toma de muestra de aceite caja multiplicadora

Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Tabla A3.2 Principales labores de Mantenimiento del plan de 12 meses

Tareas
Inspección auditiva y visual de palas
Comprobación de funcionamiento de botones de emergencia
Comprobación de nivel de aceite
Inspección para detectar fugas en el sistema hidráulico
Inspección visual Polipasto
Limpieza de cuerpo de anillos rozantes
Comprobación de desgaste y asiento de escobillas de fase y tierra
Inspección Visual Buje
Inspección visual de las pastillas de freno
Inspección para detectar fugas en el sistema hidráulico
Comprobación ausencia partículas metálicas depósito de aceite Multiplicadora
Cambio del filtro OFF-LINE de la caja multiplicadora
Comprobación de funcionamiento de Baliza
Lubricación rodamiento de pala
Engrase de caja de rodamientos de Pitch
Comprobar nivel aceite del Sistema Hidráulico
Cambio del filtro de aceite del grupo hidráulico
Comprobar funcionamiento de válvula seguridad del Sistema Hidráulico
Lubricación de Corona
Inspección visual de la corona
Lubricación de Rodamientos Principales
Inspección Auditiva de la caja Multiplicadora
Toma de muestra de aceite caja multiplicadora
Inspección visual de la estructura de la Caja Multiplicadora
Comprobación de funcionamiento del sensor de humo

Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel, 2016)

Anexo 4: Determinación del Estado actual de los componentes del Sistema Hidráulico del Aerogenerador número 5

A continuación se mostraran los resultados obtenidos en las pruebas realizadas el 26 de Abril del 2017, para determinar el estado actual de los componentes del sistema hidráulico. Dichas pruebas fueron realizadas como parte del mantenimiento preventivo que se realiza cada seis meses a los aerogeneradores del Parque Eólico Los Santos.

A.4.1 Verificación del Nivel de Aceite del Grupo Hidráulico

Para realizar la verificación del nivel de aceite del grupo hidráulico, se despresuriza el sistema y se observa que el nivel de aceite en el visor se encuentre dentro de los niveles permitidos.



Figura A4.1 Comprobación del Nivel de Aceite del Sistema Hidráulico

Fuente: Fotografía Propia

A.4.2 Estado Filtros de Aire

Para la verificación del Estado de los filtros de aire, se abre el compartimiento donde este se ubica, se realiza la inspección y si es necesario se realiza el cambio, en la inspección realizada el 26 de Abril del 2017, se determina que el filtro actual se encuentra en buen estado.



Figura A4.2 Verificación Estado Filtros de Aire

Fuente: Fotografía Propia

A.4.3 Test de Flujo y Válvula Proporcional

Al realizar el test de flujo los valores obtenidos se encuentran dentro del rango permitido:

- Grados Positivos: 6.35°/S a 11,38°/S
- Grados Negativos: -5.26°/S a -10.29°/S



Figura A4.3 Resultados Test de Flujo

Fuente: Fotografía Propia

A.4.4 Test de Tope Positivo y Negativo

Para corroborar que el Balluf se encuentre bien calibrado se utiliza el test del tope positivo y Negativo, los Valores permitidos son los siguientes:

- Tope Negativo: 0.04 ± 0.01 V
- Tope Positivo: 9.858 ± 0.01 V



Figura A4.4 Resultados Test Tope Positivo y Negativo

Fuente: Fotografía Propia

Referencias Bibliográficas

- ABB. (2011). *Technical application papers no.13: Wind power plants*. Bérghamo, Italia:
- Acuña, J. A. (2003). *Ingeniería de Confiabilidad*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
- Adnan, M. (2010). *Bearing prognostics using neural network under time varying conditions* Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (Order No. MR71004).
- Arano, I. L. (2014). *Redes Neuronales para la simulación de sistemas dinámicos en aerogeneradores* . UNED.
- 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.
- 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.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, C. F. (2016). *Hora Profesional*. Obtenido de http://cfia.or.cr/descargas/2016/horaProfesional/hora_profesional_julio16.pdf
- CoopesantosR.L. (2016). *Historia*. Obtenido de <http://www.coopesantos.com/contenido/pagina/historia.html>

- Gamesa. (2007). *G5X MOM Grupo hidráulico - Descripción*. Gamesa Corporación Tecnológica S.A.
- Gamesa. (2007). *GAMESA G52-850 KW*. España.
- Gamesa. (2010). *Global Technology, EVERLASTING ENERGY*. Obtenido de <http://www.gamesacorp.com/es/gamesa/energia-eolica/funcionamiento-parque-eolico.html>
- GTS CONFIABILIDAD, C. (2016). *Programas De Mantenimiento Basado En Condición "Mantenimiento Predictivo"*. Obtenido de http://www.confiableidad.com.ve/pmbc_5_pasos_gts_confiableidad.pdf
- Lara, J. F. (17 de Noviembre de 2015). Costa Rica suma más capacidad para generación de energía eólica. *La Nación*. Obtenido de http://www.nacion.com/nacional/servicios-publicos/Electricidad-generacion_electrica-generacion_eolica-plantas-capacidad_instalada-Instituto_Costarricense_de_Electricidad_0_1524847579.html
- Loría , G. (2016). *Diseño de un modelo de toma de decisiones para mantenimiento basado en el monitoreo del deterioro multiestado para un sistema de aerogeneración instalado en Costa Rica*. Cartago: Laboratorio de Investigación en Confiabilidad, Universidad de Alberta.
- Martínez , J., & Álvarez , C. (2015). *Diseño De Un Controlador Óptimo Usando Redes Neuronales Dinámicas Para Un Sistema De Generación Eólica*. Universidad Tecnológica De Pereira.
- Moreno, R. S., Aguilar, A. R., Hernández, E. F., & Soto, F. P. (2016). *Aplicaciones de la distribución weibull en ingeniería de confiabilidad*. Obtenido de <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013/1255/aplicaciones-distribucion-weibull-ingenieria-confiabilidad.pdf>

- Ojeda, L. R. (2007). *Probabilidad y Estadística Básica Para Ingenieros*. Ecuador: Instituto de Ciencias Matemáticas.
- Olave, V. V., & Fuentes, I. N. (2012). *Evolución de Costos ERNC*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica de Chile: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D_Eolica.html
- Pandey, M., Patel, T., Liang, X., Tian, T., & Zuo, M. (2011). *Descriptions of Pitting Experiments, Run-to-Failure Experiments, Various Load and Speed Experiments, and Crack Experiments Carried out on the Planetary Gearbox Test Rig*. Edmonton: Universidad de Alberta.
- Parque Eólico Experimental SOTAVENTO. (2017). *SOTAVENTOGALICIA*. Obtenido de <http://www.sotaventogalicia.com/es/area-tecnica/instalaciones-eolicas/funcionamiento>
- Pértegas Díaz, S., & Pita Fernández, S. (2001). *La distribución normal*. Obtenido de https://www.fisterra.com/mbe/investiga/distr_normal/distr_normal2.pdf
- Ribrant, J. (2006). Reliability performance and maintenance: A survey of failures in wind power systems. KTH school of electrical engineering.
- 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
- Rodríguez, E., Miguel, A., & Sánchez, M. (2001). *Gestión del mantenimiento Para Equipos Médicos*. La Habana: Centro de Bioingeniería, Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- Rodríguez, P. C., & Simón, N. J. (2014). *Aerogeneradores (I): funcionamiento y marco normativo de prevención de riesgos laborales*. Obtenido de Centro

Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo:
<http://www.aeeolica.org/uploads/documents/10170-aerogeneradores-i-funcionamiento-y-marco-normativo-de-prevencirn-de-riesgos-laborales.pdf>

Sunder, S. (2014). *Reliability analysis of wind turbine at high uncertain wind*. Obtenido de Anna University, Faculty of Mechanical Engineering: <http://hdl.handle.net/10603/26039>

Tian, Z. (2010). A neural network approach for remaining useful life prediction utilizing both failure and suspension data. Paper presented at the *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings - Annual*, 1-6. doi:10.1109/RAMS.2010.5447975

Tian, Z., Jin, T., Wu, B., & Ding, F. (2011). Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring. *Renewable Energy: An International Journal*, 36(5), 1502-1509. doi: 10.1016/j.renene.2010.10.028

Técnica Aplicada Internacional S.A. de C.V. (2016). *MP Software*. Obtenido de http://www.mpsoftware.com.mx/software_mantenimiento/mp_cmms.html

Zapata, C. J. (2011). *Confiabilidad en Ingeniería*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.