



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Modelo de una propuesta de mantenimiento eólico para el entrenamiento virtual en la
formación de nuevos profesionales con un enfoque a la industria**

Carvajal Martínez, Christian Andrés

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia Tecnológica

Centro de Posgrado

Maestría en Electrónica y Automatización mención Redes Industriales

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Electrónica y Automatización
mención Redes Industriales

Ing. Jiménez León, Mario Polibio Mgs.

3 de febrero del 2022

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



Proyecto de Titulación_Christian Carvajal_V3.pdf

Scanned on: 21:54 February 3, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	595
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	1411
Omitted Words	2747



Website | Education | Businesses



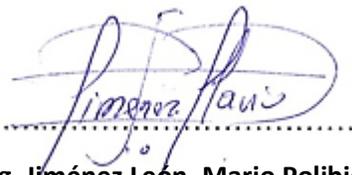
Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro De Posgrados

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Modelo de una propuesta de mantenimiento eólico para el entrenamiento virtual en la formación de nuevos profesionales con un enfoque a la industria 4.0”** fue realizado por el señor **Carvajal Martínez, Christian Andrés**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 3 de febrero del 2022



Ing. Jiménez León, Mario Polibio Mgs.

Director

C.C.: 0501519326



Vicerrectorado De Investigación, Innovación Y Transferencia de Tecnología

Centro De Posgrados

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Carvajal Martínez, Christian Andrés** con cédula de ciudadanía n.º 1804211470, declaro que el contenido, ideas, y criterios del trabajo de titulación: **Modelo de una propuesta de mantenimiento eólico para el entrenamiento virtual en la formación de nuevos profesionales con un enfoque a la industria 4.0** es de mí autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 3 de febrero del 2022

A handwritten signature in blue ink, which appears to be 'Carvajal Martínez, Christian Andrés', is written over a faint circular stamp. Below the signature is a horizontal dotted line.

Carvajal Martínez, Christian Andrés

C.C.: 1804211470



Vicerrectorado De Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Autorización de Publicación

Yo, **Carvajal Martínez, Christian Andrés**, con cédula de ciudadanía n° 1804211470, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Modelo de una propuesta de mantenimiento eólico para el entrenamiento virtual en la formación de nuevos profesionales con un enfoque a la industria 4.0** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 3 de febrero del 2022

.....
Carvajal Martínez, Christian Andrés

C.C.: 1804211470

Dedicatoria

A mis padres Miguel y Mercedes quienes han sido un pilar y apoyo fundamental en brindarme la confianza, paciencia, y amor para realizar los estudios de post grado.

A mi hermano Joel y a todos quienes de una u otra forma me tienen de ejemplo a seguir en la formación académica y personal.

A mis demás familiares, amigos, compañeros del programa de maestría, y de manera especial a Monserrath quien me ha brindado su constante apoyo en cada uno de los ciclos para culminar esta nueva etapa en mi vida y formación académica.

A todos ustedes a quienes amo infinitamente con todo mi corazón y son una parte muy importante en mi vida.

Christian A. Carvajal M.

Agradecimiento

A Dios por permitirme estar con salud y vida en estos momentos difíciles que está atravesando la humanidad, quien de una u otra forma ha cuidado mucho de todas las personas a quien amo.

A mis padres nuevamente por su apoyo incondicional.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por la creación del programa de Maestría, sus docentes y demás personal académico quienes nos supieron transmitir su conocimiento.

Y un agradecimiento sincero al Ing. Mario Jiménez quien, con su paciencia y conocimientos, pudo guiarme correctamente en el desarrollo de este trabajo de titulación.

Christian A. Carvajal M.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de figuras	14
Índice de tablas	18
Resumen	20
Abstract	21
Capítulo I: Características Generales del Proyecto.....	22
Antecedentes.....	22
Líneas de Investigación	24
Sub Líneas de Investigación.....	24

Área de Influencia.....	24
Planteamiento del Problema.....	24
Trabajos Relacionados	25
Justificación, Importancia y Alcance del proyecto	26
Objetivos.....	28
<i>Objetivo General</i>	28
<i>Objetivos Específicos</i>	28
Hipótesis de investigación.....	28
Categorización de las variables de investigación (variables independiente y dependiente).....	29
Marco Teórico Referencial	31
<i>Marco Legal</i>	31
<i>Marco Conceptual</i>	33
Diseño de la Investigación (Materiales y Métodos)	36
Capítulo II: Fundamentación Teórica	39
Energía Eólica	39
<i>Energía Eólica Onshore</i>	40
<i>Energía Eólica Offshore</i>	42

Energía Eólica en América	44
<i>Energía Eólica en América del Norte.</i>	<i>45</i>
<i>Energía Eólica en América Latina.....</i>	<i>46</i>
<i>Energía Eólica en Ecuador</i>	<i>48</i>
Energía Eólica en Europa	49
Aerogenerador	51
<i>Aerogenerador de eje vertical</i>	<i>52</i>
<i>Aerogenerador de eje horizontal</i>	<i>54</i>
Principales Componentes de un Aerogenerador	58
<i>Torre</i>	<i>58</i>
<i>Sistema de Orientación de Góndola</i>	<i>59</i>
<i>Góndola.....</i>	<i>60</i>
<i>Generador Eléctrico.....</i>	<i>60</i>
<i>Anemómetro.....</i>	<i>61</i>
<i>Sistema de Frenado en un Aerogenerador</i>	<i>62</i>
<i>Multiplicadora</i>	<i>62</i>
<i>Rotor</i>	<i>63</i>

	11
Funcionamiento de la Turbina Eólica	65
Eficiencia Energética	67
Estrategia de mantenimiento tradicional en aerogeneradores	67
<i>Estrategias Preventivas.....</i>	<i>68</i>
<i>Estrategias Reactivas</i>	<i>69</i>
El árbol Jerárquico de activos de un parque eólico	70
<i>Niveles Jerárquicos.....</i>	<i>71</i>
Técnicas de Diagnóstico Online	73
Protocolo IRIM 202410.....	73
Técnicas de Diagnóstico Offline	74
Industria 4.0	74
<i>Industria 4.0 y el Mantenimiento.....</i>	<i>77</i>
<i>Aplicaciones de la Realidad Virtual y la Realidad Aumentada en la Industria 4.0.....</i>	<i>82</i>
Software Utilizado	84
<i>Simulwind.....</i>	<i>84</i>
Capítulo III: Metodología	89
Investigación y Estudio de Herramientas	91

	12
<i>SIMULWIND: Programas y Versiones</i>	91
Modelo de Propuesta de Mantenimiento Eólico	92
<i>Análisis de Estrategias Tradicionales</i>	96
<i>Mejora Continua con un Enfoque a la Industria 4.0</i>	99
<i>Sustentación de Mantenimiento</i>	101
Creación de Tareas de Mantenimiento	103
<i>Instalación de Material</i>	105
Implementación y Pruebas de Entrenamiento Virtual	122
Capítulo IV: Indicadores y resultados del Modelo de Propuesta de Mantenimiento Eólico	132
Costos de Operación, Mantenimiento y Administración	132
Desgaste de los componentes del aerogenerador	143
Tiempo en tareas de mantenimiento	144
Niveles de preparación y uso en aerogeneradores	149
<i>Resultados de la Encuesta</i>	150
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	158
Conclusiones	158
Recomendaciones	160

Bibliografía.....162

Anexos.....172

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Modelo de comunicación conceptual de la serie de Normas IEC 61400-25</i>	32
Figura 2 <i>Top 10 de países con mayor capacidad instalada en energía eólica</i>	40
Figura 3 <i>Parque Eólico Onshore</i>	41
Figura 4 <i>Top países con tecnología eólica Onshore</i>	42
Figura 5 <i>Parque Eólico Offshore</i>	43
Figura 6 <i>Top países con tecnología eólica Offshore</i>	44
Figura 7 <i>Capacidad Instalada en Energía eólica en el Continente Americano</i>	45
Figura 8 <i>Instalaciones Eólicas en América y el Caribe al finalizar el 2020</i>	47
Figura 9 <i>Capacidad Instalada en Energía eólica en el Continente Europeo</i>	50
Figura 10 <i>Evolución de la producción eólica del 1 de enero al 25 de marzo 2021</i>	51
Figura 11 <i>Tipos de Aerogenerador</i>	52
Figura 12 <i>Aerogenerador tipo Darrieus</i>	53
Figura 13 <i>Aerogenerador tipo Savonious</i>	54
Figura 14 <i>Aero Turbina Lenta</i>	55
Figura 15 <i>Aerogenerador Tripala</i>	55
Figura 16 <i>Aerogenerador Bipala</i>	56
Figura 17 <i>Aerogenerador Monopala</i>	56
Figura 18 <i>Barlovento</i>	57

	15
Figura 19 <i>Sotavento</i>	57
Figura 20 <i>Esquema de un aerogenerador</i>	58
Figura 21 <i>Torre</i>	59
Figura 22 <i>Sistema de Orientación de la Góndola</i>	59
Figura 23 <i>Estructura exterior de la Góndola</i>	60
Figura 24 <i>Generador</i>	61
Figura 25 <i>Veleta y Anemómetro</i>	61
Figura 26 <i>Sistema de Frenado de Aerogenerador</i>	62
Figura 27 <i>Multiplicadora</i>	63
Figura 28 <i>Palas de Aerogenerador</i>	64
Figura 29 <i>Rodamientos en Palas del Aerogenerador</i>	64
Figura 30 <i>Buje del Aerogenerador</i>	65
Figura 31 <i>Eje Principal</i>	65
Figura 32 <i>Descripción esquemática de los diversos tipos de mantenimiento</i>	68
Figura 33 <i>Árbol jerárquico de parque eólico</i>	72
Figura 34 <i>Esquema digital en procesos de Industria</i>	76
Figura 35 <i>Pilares tecnológicos de la Industria 4.0</i>	80
Figura 36 <i>Entrenamiento de operarios asistido por realidad aumentada</i>	84
Figura 37 <i>Aerogenerador en Simulwind</i>	86

Figura 38 <i>Generador de inducción de doble alimentación</i>	87
Figura 39 <i>Modelo de Aerogenerador</i>	87
Figura 40 <i>Estructura del modelo de mantenimiento</i>	93
Figura 41 <i>Estrategia de Mantenimiento</i>	103
Figura 42 <i>Archivos dentro de la carpeta de Simulwind descargada</i>	106
Figura 43 <i>Flujograma general para la creación de tareas de mantenimiento en Simulwind</i>	108
Figura 44 <i>Flujograma en la creación de tareas del Sistema de Frenado</i>	110
Figura 45 <i>Flujograma en la creación de tareas del Mecanismo de Orientación de Palas</i>	113
Figura 46 <i>Flujograma en la creación de tareas del Mantenimiento en Torre</i>	114
Figura 47 <i>Flujograma en la creación de tareas en la Multiplicadora</i>	116
Figura 48 <i>Flujograma en la creación de tareas en el Generador</i>	117
Figura 49 <i>Flujograma en la creación de tareas en el Rotor (Buje y Palas)</i>	118
Figura 50 <i>Flujograma en la creación de tareas en la Transmisión Mecánica</i>	120
Figura 51 <i>Flujograma general de entrenamiento virtual de las tareas de mantenimiento</i>	123
Figura 52 <i>Flujograma de entrenamiento virtual del Sistema de Frenado</i>	124
Figura 53 <i>Flujograma de entrenamiento virtual del Mecanismo de Orientación de Palas</i>	126
Figura 54 <i>Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en Torre</i>	127
Figura 55 <i>Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en Multiplicadora</i>	128
Figura 56 <i>Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en Generador</i>	129

Figura 57 <i>Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en el Rotor</i>	130
Figura 58 <i>Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en la Transmisión Mecánica</i>	131
Figura 59 <i>Costos de Inversión en Estados Unidos</i>	136
Figura 60 <i>Evolución del factor de planta para plantas eólicas en Estados Unidos</i>	139
Figura 61 <i>Desgaste en Palas</i>	143
Figura 62 <i>Tiempo en el la Primera simulación de Paro de Turbina.</i>	146
Figura 63 <i>Tiempo en la próxima simulación de Paro de Turbina</i>	146
Figura 64 <i>Resultado de la primera pregunta</i>	151
Figura 65 <i>Resultado de la segunda pregunta</i>	152
Figura 66 <i>Resultado de la tercera pregunta</i>	153
Figura 67 <i>Resultado de la cuarta pregunta</i>	153
Figura 68 <i>Resultado de la quinta pregunta</i>	154
Figura 69 <i>Resultado de la sexta pregunta</i>	154
Figura 70 <i>Resultado de la séptima pregunta</i>	155
Figura 71 <i>Resultado de la octava pregunta</i>	156
Figura 72 <i>Resultado de la novena pregunta</i>	156
Figura 73 <i>Resultado de la décima pregunta</i>	157
Figura 74 <i>Promedio de aceptación del modelo de propuesta</i>	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Trabajos Relacionados</i>	25
Tabla 2 <i>Operacionalización de las Variables</i>	30
Tabla 3 <i>Matriz de diseño de investigación</i>	36
Tabla 4 <i>Principales Centrales Eólicas en Ecuador hasta el 2021</i>	48
Tabla 5 <i>Fases dentro del método de Desarrollo Iterativo e Incremental</i>	90
Tabla 6 <i>Modos de fallo y causas principales en un aerogenerador</i>	96
Tabla 7 <i>Causas de falla en los componentes del aerogenerador</i>	97
Tabla 8 <i>Beneficios del Mantenimiento Productivo Total</i>	100
Tabla 9 <i>Lista de Prácticas de Mantenimiento en Simulwind</i>	104
Tabla 10 <i>Costos de Personal de Operación para una planta de 30 MW</i>	133
Tabla 11 <i>Costos de Mantenimiento</i>	134
Tabla 12 <i>Costos Administrativos</i>	135
Tabla 13 <i>Costos de Inversión en Europa al año 2011</i>	137
Tabla 14 <i>Distribución de los costos de inversión para tecnologías de plantas eólicas</i>	138
Tabla 15 <i>Costos de estrategia de Mantenimiento Tradicional</i>	140
Tabla 16 <i>Costos de estrategia de Mantenimiento del Modelo de Propuesta</i>	141
Tabla 17 <i>Comparación de Costos entre las estrategias de Mantenimiento</i>	142
Tabla 18 <i>Comparación de Desgaste de los componentes</i>	144

Tabla 19 <i>Tiempos de simulación de prácticas en Simulwind</i>	147
Tabla 20 <i>Comparación de tiempos en tareas de mantenimiento</i>	149
Tabla 21 <i>Resultados en porcentaje de la encuesta de validación</i>	157

Resumen

El trabajo presenta la estructura de un modelo de propuesta de mantenimiento eólico para los aerogeneradores tripala de eje horizontal. El modelo de propuesta se relaciona con la Industria 4.0 en el uso de la tecnología de la realidad virtual que permite ingresar a un escenario donde el usuario realiza acciones de una manera inmersiva de las tareas de mantenimiento en los principales componentes del aerogenerador de eje horizontal, con el uso de un software de simulación denominado Simulwind. El programa ofrece el entorno de simulación de la sala de mantenimiento de un modelo de aerogenerador para la creación de las tareas y digitalización de procesos que permiten interactuar e inspeccionar los componentes, mediante el uso de herramientas y equipos necesarios para detectar defectos y solventar fallas. De esta forma se interpretan resultados que posibilitan comparar indicadores entre el modelo de propuesta obtenidos en el entrenamiento virtual con las estrategias tradicionales de mantenimiento. Adicional a ello el modelo de propuesta con la realidad virtual satisface la necesidad formativa en la capacitación de nuevos profesionales ligados al mantenimiento de los componentes del aerogenerador en la representación del funcionamiento del proceso en tiempo real antes de ser ejecutado para prevenir averías y lograr otros indicadores como la reducción de costos y errores humanos en el procedimiento y ejecución.

Palabras Clave: aerogenerador, industria 4.0, entrenamiento virtual, Simulwind, mantenimiento eólico

Abstract

The document presents the structure of a wind maintenance proposal model for three-blade horizontal axis wind turbines. The proposal model is related to Industry 4.0 in the use of virtual reality technology that allows entering a scenario where the user performs actions in an immersive way of maintenance tasks in the main components of the horizontal axis wind turbine, with the use of simulation software called Simulwind. The program offers the simulation environment of the maintenance room of a wind turbine model for the creation of tasks and digitization of processes that allow interaction and inspection of components, through the use of tools and equipment necessary to detect defects and solve failures. In this way, results are interpreted that make it possible to compare indicators between the proposed models obtained in virtual training with traditional maintenance strategies. In addition to this, the proposal model with virtual reality satisfies the training need in the training of new professionals linked to the maintenance of the components of the wind turbine in the representation of the operation of the process in real time before being executed to prevent breakdowns and achieve other indicators. Such as the reduction of costs and human errors in the procedure and execution.

Keywords: wind turbine, industry 4.0, virtual training, Simulwind, wind maintenance

Capítulo I

Características Generales del Proyecto

Antecedentes

El empleo y acceso de las energías alternas en la sociedad y en el sector económico para la producción de energía actualmente es muy necesario y primordial. El desarrollo agroindustrial, el crecimiento de los países y las mejoras en la calidad de vida han originado que la demanda de energía haya tenido un crecimiento exponencial en los últimos 10 años. El aprovechamiento energético de los recursos fósiles ha sido el principal causante del cambio climático en nuestro planeta (K. Seiche, 2007).

El desarrollo del sector eólico en países como Alemania que es uno de los países europeos que dominan el mercado de las energías alternativas demuestra que el sector de la energía eólica se ha convertido en una parte importante de la economía alemana. Desde el punto de vista inversionista y de costos de operación es obligatorio el funcionamiento económico de los aerogeneradores (T. Muuß, 2005).

Actualmente, los aerogeneradores modernos tienen un alto nivel de desarrollo tecnológico. Factores como el tamaño y el rendimiento del sistema, hacen que la carga sobre los componentes individuales del sistema también aumente. Por esta razón se deben desarrollar conceptos de mantenimiento y operación, que puedan aumentar el ciclo de vida operacional de la turbina y de forma paralela pueda reducir los costos para el operador (Y. D. Pernia Mora, 2013).

Los recursos naturales gradualmente van agotándose, indicando cambios en la búsqueda de energías sostenibles, que no se agoten y que sean ecológicas con el medio ambiente. China, Estados Unidos, Alemania e India son los cuatro países que dominan el mercado de la energía eólica. Los aerogeneradores en agua o tierra generan electricidad con el movimiento de las aspas transformando la energía cinética en mecánica (Infobae, 2018).

Al establecer un fundamento metodológico para el mantenimiento eólico destaca el estudio del comportamiento de los sistemas vinculados al contexto hombre-máquina conocido como metodología Jenkins, que se caracteriza por ser poseedor de un esquema técnico donde sus diferentes componentes se encuentran en constante interacción con propósitos bien definidos (López, 2016).

Al realizar un monitoreo a condición se obtienen medidas de vibración, datos de emisiones acústicas, información sobre el análisis del aceite, entre otras. Por lo tanto el hecho de optimizar las actividades de mantenimiento basándose en dicha información de relevancia minimizando costos variables de mantenimiento y operación es uno de los objetivos del mantenimiento basado en la condición (Amayri & Tian, 2011).

Factores como ubicaciones geográficas, estacionalidad, y disponibilidad de logística, equipo de transporte, mano de obra calificada, gastos de viaje y material son muy importantes analizar al realizar el mantenimiento de las palas del aerogenerador, este elemento es uno de los principales componentes de la turbina eólica, así como también varios elementos de mantenimiento que son importantes al desarrollar estos factores (Nandipati, Nichenametla, & Waghmare, 2018). La operación y mantenimiento eficiente de las máquinas eólicas es resultado de un análisis de fallas en la turbina observando y detallando los elementos o componentes con dicho fallo (Saxena & Rao, 2013).

Uno de los modelos de mantenimiento realizado por simulación lo tenemos en un trabajo desarrollado en una granja con turbinas eólicas cuyos resultados es una optimicidad del mantenimiento y un costo minimizado. Hablando estratégicamente se analiza con respecto a una combinación de los datos de falla del sistema de guiñada y la velocidad del viento (Wang, Liu, Cao, Jiang, & Ding, 2020).

En la visión de la Industria 4.0 en industrias con tendencia a la digitalización de procesos, nace una herramienta para la formación de nuevos profesionales ligados al sector eólico que permite la detección temprana de fallos en los componentes principales de la turbina eólica. Con dicho objetivo

Simulwind es un instrumento que cumple con los parámetros mencionados como un software de simulación muy ajustable a las necesidades en la formación de usuarios y profesionales encargados del mantenimiento y operación eólica (Reoltec, 2019).

Líneas de Investigación

- Automática y Control
- Sistemas Electrónicos y Computacionales

Sub Líneas de Investigación

- Domótica e Inmótica
- Fuentes Alternativas

Área de Influencia

- Gestión energética en el sector eólico de América y Europa

Planteamiento del Problema

Debido a que la demanda de consumo de energía en el mundo aumenta de forma considerable, la disponibilidad de los recursos naturales decrece de manera paralela, hasta llegar a un punto que no haya los recursos suficientes que satisfaga a la demanda de toda una sociedad; de tal forma que en un futuro no muy lejano es indispensable el desarrollo de energías amigables con el medio ambiente como lo es la energía eólica que cuenta con la ventaja de evitar las emisiones de gases de efecto invernadero.

El mantenimiento de los parques eólicos en diversos procesos de trabajo al interior del aerogenerador, muestran como evidencia una gran cantidad de riesgos laborales para el personal, la inexperiencia de los operadores se suma a la inexistencia de un modelo de estrategia de mantenimiento que permita establecer ventajas con respecto a estrategias tradicionales.

Trabajos Relacionados

En función de la investigación previa se pudo identificar los siguientes trabajos relacionados, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Trabajos Relacionados

No	Artículo/Proyecto	Autor	Año	Descripción
1	A research on the Monte Carlo simulation based on-condition maintenance strategy for wind turbines	Dameng Wang, Yibing Liu, Xin Cao, Yanwei Jiang, Peng Ding.	2020	Este artículo estudia una simulación de Monte Carlo basada en una estrategia de mantenimiento en condiciones para turbinas eólicas.
2	Cost-Effective Maintenance Plan for Multiple Defect Types in Wind Turbine Blades	Srikanth Nandipati, Amith Nag, Nichenametla, Abhay Laxmanrao Waghmare	2018	Este artículo habla sobre el uso de los parámetros de confiabilidad calculado a partir de datos de campo para múltiples grupos de defectos en orden para formular múltiples planes de mantenimiento y luego consolidar en un único plan de mantenimiento rentable.
3	Optimizing Life Cycle Cost of Wind Turbine Blades using Predictive Analytics in Effective Maintenance Planning	Amith Nag, Nichenametla, Srikanth Nandipati, Abhay Laxmanrao Waghmare	2017	Este documento es un intento de hacer uso de las amplias prácticas técnicas de análisis predictivo en el dominio eólico para abordar estos desafíos y seguir siendo competitivos en el mercado.

No	Artículo/Proyecto	Autor	Año	Descripción
4	Estrategias de Operación y Mantenimiento de una turbina eólica	Yoel David Pernía Mora, Yarú Najem Méndez Hernández	2014	Este trabajo presenta una visión general de los componentes de una torre eólica. Se abordan los problemas típicos de funcionamiento. Se explica los tipos de mantenimiento, que se llevan a cabo en el aerogenerador y los conceptos que en la actualidad se aplican con el objetivo de incrementar su disponibilidad y la disminución de costos de operación por paradas no programadas.
5	Wind Turbine Failure Analysis for Wind Farm at Devgarh in Rajasthan	Bharat Kumar Saxena .K. V. S. Rao	2013	En este artículo se realizó un estudio analítico relacionado con fallas de aerogeneradores para un parque eólico en Devgarh en el distrito de Pratapgarh de Rajasthan, India
6	Condition based maintenance of wind turbine systems considering different turbine types	Abeer Amayri, Zhigang Tian	2011	Este artículo presenta el desarrollo del mantenimiento centrado en la condición enfocado para los sistemas de turbinas eólicas considerando la economía y dependencia de diferentes tipos de generadores eólicos.

Justificación, Importancia y Alcance del proyecto

La necesidad del proyecto se basa en el desarrollo de investigaciones que satisfagan a profundidad los temas relacionados con la Electrónica y Automatización. Tiene como finalidad cumplir con las competencias del uso de energías alternativas y relacionarlos con los procesos de digitalización enfocados a la industria 4.0.

Una de las problemáticas a resolver es el aumento de la demanda de consumo de energía que hace de la disponibilidad de los recursos naturales más escasos, por lo tanto, es necesario el uso de

energía eólica ya que es una fuente de energía que presenta la ventaja de no generar emisiones de dióxido de carbono ni residuos contaminantes.

Como problemática final los riesgos laborales al trabajar en la turbina eólica para realizar el mantenimiento, así como la falta de experiencia de nuevo personal, hace necesario el uso de un software para el entrenamiento virtual en la formación de profesionales encargados del mantenimiento en diversos procesos que puedan basarse en un nuevo modelo de estrategia de actividades de mantenimiento en las principales partes de una turbina eólica.

La importancia del proyecto de investigación radica en los beneficios de la simulación virtual. Son varios los beneficios al trabajar con energía eólica, entre ellos es una energía que se renueva, no contamina, no se agota, reduce el uso de petróleo, carbón, gas natural y gas licuado de petróleo. El proceso de entrenamiento virtual trae como beneficio la capacitación de personal que realizan mantenimiento de las turbinas eólicas, destacando la reducción en riesgos laborales causados por accidentes en trabajo de mantenimiento en aerogeneradores. Otro de los principales beneficios que ofrece este modelo de propuesta es la mejora de las actividades de mantenimiento de la turbina eólica.

Se pretende como alcance implementar y desarrollar el entrenamiento virtual de tareas de mantenimiento en un aerogenerador de eje horizontal tripala basado en un modelo de propuesta de mantenimiento que cumpla con las prioritarias actividades de mantenimiento en las principales partes de un aerogenerador. Así como también interpretar resultados que permitan establecer una igual o mejor comparación de indicadores entre el modelo de propuesta de mantenimiento realizados en el entrenamiento virtual con respecto a las estrategias tradicionales, destacando programas de aplicación como Simulwind, que es una herramienta formativa de la era digital.

Objetivos

Objetivo General

Generar una estrategia de mantenimiento de un aerogenerador de eje horizontal para simular el mantenimiento eólico, orientado al entrenamiento en la formación de nuevos profesionales ligados a la industria 4.0

Objetivos Específicos

- Recolectar información necesaria e importante sobre las estrategias de mantenimiento actual y tradicional de aerogeneradores en sectores de América y Europa que dominan el mercado de energías alternativas.
- Elaborar el modelo de propuesta de mantenimiento eólico basado en las prioritarias actividades de mantenimiento en las principales partes de una turbina eólica.
- Crear en el software de simulación eólico las tareas de entrenamiento virtual de acuerdo al modelo de propuesta de actividades y componentes de mantenimiento del aerogenerador.
- Implementar y desarrollar en el software cada una de las prácticas de entrenamiento virtual basadas en el modelo de propuesta.
- Establecer una comparación de indicadores con igual o mejores resultados entre el modelo de propuesta de mantenimiento eólico con respecto a las tradicionales.

Hipótesis de investigación

El modelo de una propuesta de mantenimiento eólico permitirá el entrenamiento virtual en la formación de nuevos profesionales ligados a la industria 4.0.

Categorización de las variables de investigación (variables independiente y dependiente).

A partir de la hipótesis se consideran dos variables:

- **Variable Independiente:** Modelo de una propuesta de mantenimiento eólico.

- **Variable Dependiente:** Entrenamiento virtual en la formación de nuevos profesionales ligados a la industria 4.0

Conocidas las variables independiente y dependiente de la hipótesis planteada, en la Tabla 2 se muestra la operacionalización de las variables.

Tabla 2

Operacionalización de las Variables

VARIABLES	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Entrenamiento virtual en la formación de nuevos profesionales ligados a la industria 4.0	Dependiente	El entrenamiento virtual es aquel que, dirigido por un entrenador personal cualificado, tiene lugar mediante una plataforma y tecnología de procesos digitales de la industria y los servicios relacionados con la empresa.	Simular de forma virtual el entrenamiento para realizar el mantenimiento de los aerogeneradores; aspecto importante en la formación de nuevos profesionales, todo ello relacionado con los procesos de digitalización que enfoca la industria 4.0	Manipulación virtual de herramientas de operación de trabajo eólico Mantenimiento virtual de los daños en turbinas eólicas	Altos niveles de preparación y experiencia en el manejo de herramientas de uso en aerogeneradores. Aumento de seguridad laboral frente a situaciones de riesgo.
Modelo de una propuesta de mantenimiento eólico.	Independiente	Modelo de un proyecto o una idea de mantenimiento en turbinas de generación eólica que se presenta a un estimado grupo de personas para que se acepte y de conformidad para realizarlo.	Un modelo basado en las prioritarias actividades de mantenimiento en las principales partes de una turbina eólica.	Costos de operación Desgaste en los componentes de la turbina Tiempo de mantenimiento Atrasos en los mantenimientos	Reducción de costos de operación Igual o menor desgaste de los componentes del aerogenerador Igual o menor tiempo de tarea de mantenimiento Mantenimiento eficaz y a tiempo

Marco Teórico Referencial

Marco Legal

- Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos de trabajo (Cobreiro & Jiménez, Notas Técnicas de Prevención, Riesgos Laborales en las Operaciones de Mantenimiento, 2014).

“Es importante que toda operación de mantenimiento, ajuste, desbloqueo, revisión o reparación que pueda suponer un peligro para los trabajadores se realice tras haber parado o desconectado el equipo, comprobado la inexistencia de energías residuales peligrosas y haber tomado medidas para evitar la puesta en marcha o conexión accidental mientras se realiza la operación”.

- Norma Técnica Ecuatoriana, AEROGENERADORES – PARTE 25 -2: COMUNICACIONES PARA LA MONITORIZACIÓN Y EL CONTROL DE PARQUES EÓLICOS – MODELOS DE INFORMACIÓN (NTE INEN-IEC 61400-25-2, 2014).

La serie de Normas IEC 61400-25 tienen como objetivo la comunicación entre los componentes del parque eólico. Las comunicaciones de la norma se basan en un modelo de diseño de software en el que las tareas son repartidas entre los proveedores de recursos (servidores) y los demandantes (clientes). El sistema puede crecer en magnitud al basarse en la modelación de tres áreas.

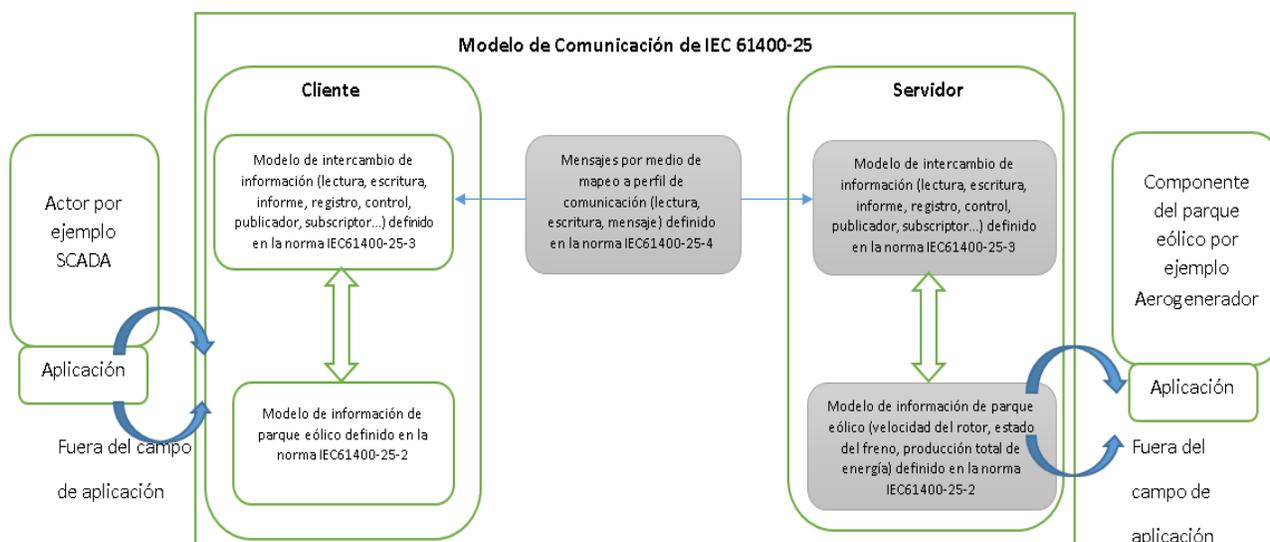
1. Modelos de información del parque eólico.
2. Modelos de intercambio de información.
3. Mapeo de los dos modelos previos a un perfil de comunicaciones normalizado.

La interfaz entre cliente y servidor se constituye por el modelo de información del parque eólico, el

cual ofrece al cliente una mejor visión, orientada a objetos de información presentes en el parque eólico y se constituye también por el modelo de intercambio de información que refleja el trabajo realizado por el servidor como se observa en la Figura 1.

Figura 1

Modelo de comunicación conceptual de la serie de Normas IEC 61400-25



Nota. Se describe la serie de Normas IEC 61400-25 en aspectos como por ejemplo la información que proporciona un componente del aerogenerador, como la habilitación al permiso de los datos de la velocidad de giro del rotor. Recuperado de (NTE INEN-IEC 61400-25-2, 2014).

- Constitución de la República del Ecuador, (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

En el artículo 413 establece que “El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables diversificadas, de bajo impacto, que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas y el derecho al agua”.

- Ley Orgánica de Eficiencia Energética, (Gobierno del Ecuador, 2019).

Art 17.- Ahorro y uso eficiente de la energía- A nivel nacional todo consumidor de energía debe velar permanentemente porque sus consumos estén enmarcados en el uso racional de energía, y adaptar sus comportamientos de consumo, orientándolos al ahorro energético, sin que este signifique disminuir sus condiciones de servicio, comodidad y producción.

Art. 20.- Investigación y desarrollo tecnológico. - El estado ecuatoriano favorecerá la investigación científica y el desarrollo tecnológico en el ámbito de la eficiencia energética y uso racional de la energía a nivel de las universidades, escuelas politécnicas, centros de investigación.

Marco Conceptual

Las siguientes definiciones sintetizan los conceptos fundamentales de las principales áreas de estudio del proyecto:

- **Energía Eólica:** Es la energía que se obtiene del viento. Se trata de un tipo de energía que considera la velocidad de las corrientes de aire para convertirla en electricidad a través de un generador eléctrico. Es una energía renovable, ecológica, que reemplaza la energía producida por el petróleo, carbón, gas natural, y gas licuado de petróleo (Renovables, 2008).
- **Aerogenerador:** Es un generador eléctrico que convierte la energía proveniente de la velocidad del viento en energía mecánica a través de una hélice en energía eléctrica gracias a la existencia de un alternador (Díez, 2002).
- **Aerogeneradores de eje horizontal:** La disposición del eje en forma horizontal de este tipo de aerogeneradores hace que se caractericen por girar las palas en dirección perpendicular a la

velocidad del viento. Son de dos tipos, aerogeneradores lentos, aquellos que suelen funcionar en "isla" y aeroturbinas rápidos que son aquellos que se conectan a la red (Alcobendas, 2018).

- **Eficiencia energética:** Consiste en las acciones para optimizar la relación entre la implementación de diversas medidas de gestión, hábitos de cultura en la comunidad e inversiones en tecnologías más eficientes, sin afectar a la comodidad, servicio y calidad de vida de la población (Energía y Sociedad, 2017).
- **Automatización y Mantenimiento de Aerogeneradores:** Los aerogeneradores funcionan permanentemente en las condiciones atmosféricas ambientales más diversas. La importancia de una buena solución automatizada de un parque eólico es vital para conseguir altas tasas de eficiencia y evitar tiempos de inactividad de los molinos. Por otro lado los sistemas de supervisión y registro de datos y por tanto las comunicaciones entre las diferentes turbinas y el centro de control deben aportar toda la información de manera precisa (Pilz, 2018).
- **Paro de Turbina:** Conjunto de pasos necesarios para realizar el paro de la turbina y proceder al mantenimiento de cambio o ajuste de componentes del aerogenerador, etc. (Jaramillo F. , 1979).
- **Acción de Ruptura:** Es la acción mecánica de los elementos que forman parte de los componentes del aerogenerador, herramientas, piezas y materiales con los cuales se va a trabajar (Tescnor, 2012).
- **Bloqueo de Alta Velocidad:** Conjunto de pasos necesarios para bloquear la turbina cuando el eje rápido llega a valores de velocidad consideradamente altos (Jaramillo F. , 1979).

- **Herramientas de simulación virtual.** Son herramientas importantes en la formación de los nuevos profesionales del sector eólico que tienen una tendencia con la digitalización de los procesos de operación y mantenimiento y detección temprana de fallos en los componentes del aerogenerador enfocado a la industria 4.0 (Reoltec, 2019).
- **Modelo de mantenimiento de los sistemas de generación eólica.** Consiste en una idea o estrategia elaborada en un orden jerárquico y sistemático para establecer el correcto funcionamiento de los sistemas y subsistemas que garanticen seguridad y organización (López, 2016).
- **Mantenimiento Periódico.** Son las actividades establecidas en un tiempo determinado que garanticen el funcionamiento de los equipos y componentes de un sistema (HeTech Marpos, 2013).
- **Mantenimiento basado en la condición.** Nace en un contexto en el que la cultura de mantenimiento comúnmente establecida a nivel global se caracteriza en una combinación de tareas correctivas y preventivas basadas en la experiencia (Altran, 2018).
- **Mantenimiento basado en la confiabilidad.** Es un método estructurado para establecer la mejor estrategia de mantenimiento, con el objetivo de definir un proceso sistemático de análisis que garantice la confiabilidad y seguridad de la operación del equipo con el menor costo posible (ENGEMAN, 2018).
- **Industria 4.0.** Es el proceso de digitalización de la industria y todos los servicios relacionados con la empresa con los que dispone para aprovecharlos al máximo (ISOTools, 2018).

Diseño de la Investigación (Materiales y Métodos)

El presente trabajo se basa en implementar y desarrollar el entrenamiento virtual de tareas de mantenimiento de aerogeneradores basadas en un modelo de propuesta de mantenimiento que cumpla con las prioritarias actividades de mantenimiento en las principales partes de una turbina eólica. Así como también interpretar resultados que permitan establecer una igual o mejor comparación de indicadores entre el modelo de propuesta de mantenimiento realizados en el entrenamiento virtual con respecto a las estrategias tradicionales, destacando programas de aplicación como Simulwind, que es una herramienta formativa de la era digital.

La secuencia de investigación se desarrolló como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Matriz de diseño de investigación

Objetivo Específico	Técnica	Instrumentos/Medios	Indicadores
Recolectar información necesaria e importante sobre las estrategias de mantenimiento actual y tradicional de aerogeneradores en sectores de América y Europa que dominan el mercado de energías alternativas.	Investigación bibliográfica	Hoja de validación de datos de referencia Hoja de cálculo	Variedad de estrategias de mantenimiento. Porcentaje de información recolectada. Hojas de datos de potencia eléctrica de aerogeneradores en sectores con mayor mercado de energías alternativas.

Objetivo Específico	Técnica	Instrumentos/Medios	Indicadores
Elaborar el modelo de propuesta de mantenimiento eólico basado en las prioritarias actividades de mantenimiento en las principales partes de una turbina eólica.	Investigación bibliográfica Investigación bibliográfica	Hoja de datos de referencia Hoja de Cálculo	Actividades de mantenimiento Principales partes del aerogenerador Porcentaje de avance en la propuesta de modelo de mantenimiento
Crear en el software de simulación eólico las tareas de entrenamiento virtual de acuerdo al modelo de propuesta de actividades y componentes de mantenimiento del aerogenerador.	Investigación experimental	Simulwind	Cantidad de tareas de mantenimiento creadas Número de pasos a seguir en cada actividad. Cantidad de elementos y herramientas necesarias a utilizar en cada uno de los pasos creados.
Implementar y desarrollar en el software cada una de las prácticas de entrenamiento virtual basadas en el modelo de propuesta.	Investigación experimental	Simulwind	Porcentaje completado de la tarea Porcentaje completado de los pasos a seguir en la actividad Porcentaje de herramientas utilizadas en el entrenamiento virtual

Objetivo Específico	Técnica	Instrumentos/Medios	Indicadores
Establecer una comparación de indicadores con igual o mejores resultados entre el modelo de propuesta de mantenimiento eólico con respecto a las tradicionales.	Investigación bibliográfica	Hoja de datos de referencia	Igual o menor desgaste del componente eólico
	Investigación experimental	Simulwind	Igual o menor tiempo de reparación del aerogenerador Disminución de accidentes laborales. Alto desempeño de profesionales ligados a la industria 4.0 en el manejo de herramientas de operación y control por simulación virtual Alto conocimiento sobre los pasos a desarrollar en el mantenimiento automatizado por simulación de turbinas eólicas

Capítulo II

Fundamentación Teórica

La energía renovable en auge actualmente es la energía eólica; la cual muchas empresas industriales han visto la necesidad de coordinar su producción haciendo uso de este tipo de energía, ya que presenta diversas ventajas, ya sean desde el punto de vista ambiental y económico principalmente. El desarrollo agroindustrial, el crecimiento de los países y el aumento de la demanda de energía en los últimos años son factores importantes para que países a nivel mundial analicen el uso de esta energía renovable.

Conceptos de mantenimiento y operación son importantes para aumentar el ciclo de vida de operación de la turbina y también para reducir costos al operador, ya que el tamaño y rendimiento del sistema aumenta la carga en cada uno de los principales componentes del aerogenerador.

En el campo de automatización, el proceso es vital para conseguir eficiencia energética en altos índices. Así, profesionales ligados a la industria 4.0 están orientados a la era de la digitalización y los procesos inteligentes, por lo que el entorno y trabajo con software de actividades y tareas del sector eólico permiten practicar y entrenar de manera virtual con las herramientas y componentes necesarios en su diario vivir.

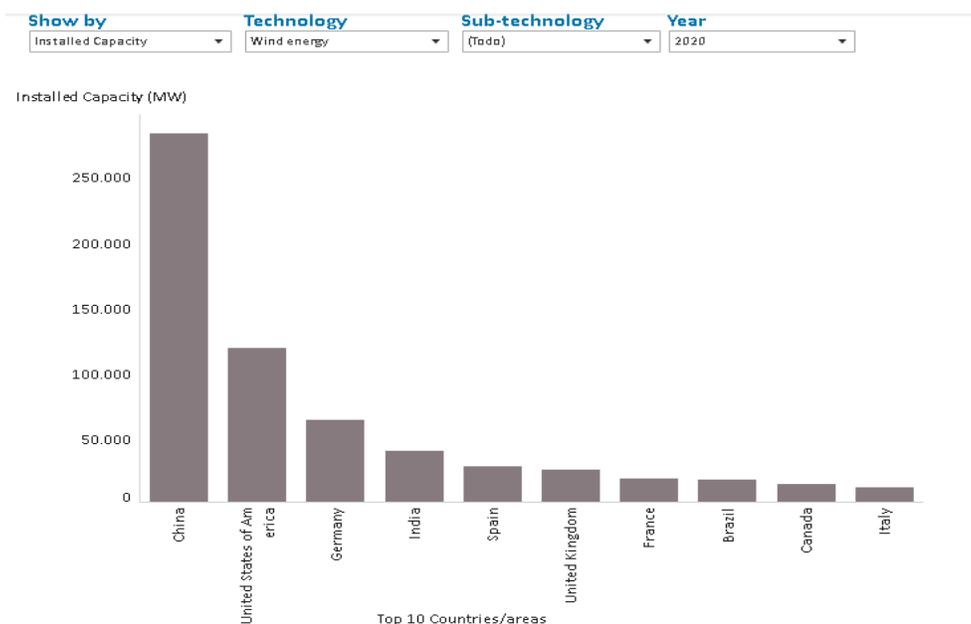
Energía Eólica

La energía eólica es la energía que se obtiene del viento. Se trata de un tipo de energía cinética; es decir depende mucho de la velocidad del viento. Esta energía la podemos convertir en electricidad a través de un generador eléctrico. Es una energía renovable, limpia, que no contamina y que ayuda a reemplazar la energía producida a través de los combustibles fósiles (Renovables, 2008).

China es el país con mayor producción de energía eólica como se ilustra en la Figura 2; además estudios indican que la energía eólica a nivel mundial creció un 10% en 2019 hasta situarse en 671 GW (Asociación Empresarial Eólica, 2020).

Figura 2

Top 10 de países con mayor capacidad instalada en energía eólica



Nota. Se observa el mayor productor de energía eólica del mundo que es China, seguido de países como Estados Unidos, Alemania, India y España. Recuperado de (IRENA, 2020).

Entre los complejos eólicos más resaltantes de producción de energía eólica se tiene al Complejo Eólico Gansu con 7965 MW de capacidad localizado en China y el Centro de Energía Alta en California Estados Unidos con 1547 MW de capacidad (Roca, 2015).

Energía Eólica Onshore

Son los parques eólicos cuya construcción es sobre la superficie terrestre como se observa en la Figura 3, y representan el 90% de la producción de energía eólica mundial (Airpes, 2020).

Figura 3*Parque Eólico Onshore*

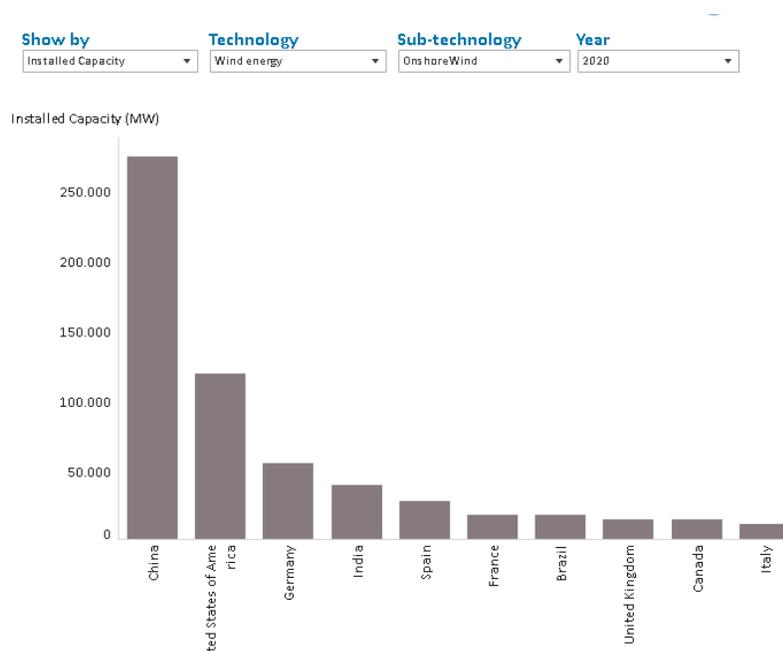
Nota. Se observa un ejemplo de parque eólico onshore. Recuperado de (Airpes, 2020).

Las mantenencias de sus equipos son de vital importancia. A pesar de representar varias ventajas, se destaca el costo de instalación que es mucho menor con respecto a otras formas de energía eólica, el acceso al trabajo es más sencillo, y la vida útil de los equipos es muy alta. Entre las desventajas de su uso es la adaptación de la construcción a la geografía y estudio del relieve terrestre (Airpes, 2020).

Los países que disponen de parques eólicos con tecnología onshore destacan nuevamente China, Estados Unidos, Alemania, India y España como se observa en la Figura 4.

Figura 4

Top países con tecnología eólica Onshore



Nota. Se observa los países mejor posicionados en energía eólica onshore. Recuperado de (IRENA, 2020).

A nivel mundial hasta el año 2020, la capacidad instalada de los países que lideran esta energía eólica son China con 273002.6 MW y Estados Unidos con 117714.8 MW, seguido de países como Alemania, India, España, Francia, Brasil, El Reino Unido, Canadá e Italia con una capacidad instalada por debajo de los 60000 MW (IRENA, 2020).

Energía Eólica Offshore

Como se observa en la Figura 5, son estructuras que se construyen aproximadamente a 41 kilómetros de la costa y 27.5 metros de profundidad (Airpes, 2020).

Figura 5*Parque Eólico Offshore*

Nota. Se observa un ejemplo de parque eólico offshore. Recuperado de (Airpes, 2020).

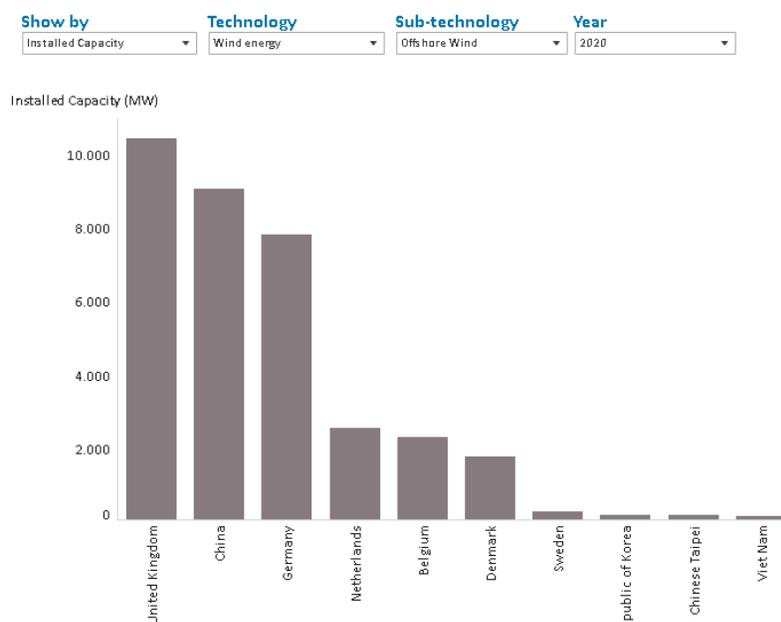
Entre sus ventajas destaca la circulación del viento a mayores velocidades porque en el mar no existen obstáculos que reduzcan la velocidad del viento. La fatiga de un aerogenerador se ve disminuida porque existe menos turbulencia ambiental (Ramírez, 2014).

Los parques son muchos más grandes que en tierra ya que disponen de una gran cantidad de espacio. El impacto visual y el ruido son un problema de cual no preocuparse ya que están muy alejados de la costa. Una de sus principales desventajas son los altos costos de instalación y la falta de infraestructura eléctrica (Ramírez, 2014).

Los países que disponen de parques eólicos con tecnología offshore destacan en el podio el Reino Unido, China y Alemania como se observa en la Figura 6.

Figura 6

Top países con tecnología eólica Offshore

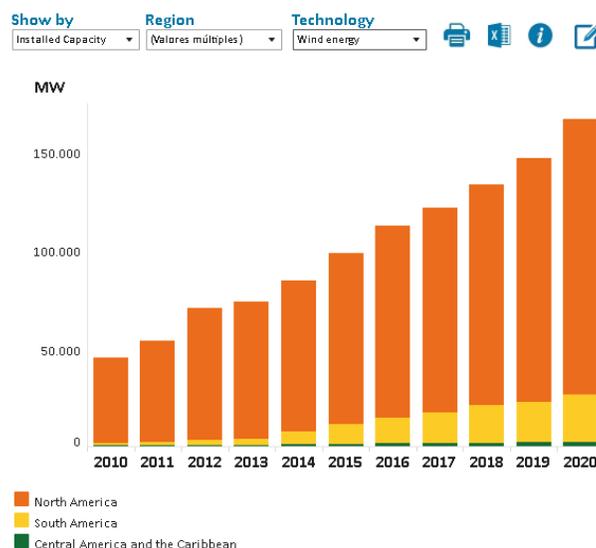


Nota. Se observan los países mejor posicionados en energía eólica offshore. Recuperado de (IRENA, 2020).

A nivel mundial hasta el año 2020, la capacidad instalada de los países que lideran esta energía eólica son El Reino Unido con 10383 MW y China con 8990 MW, seguido de países como Alemania, Holanda, Bélgica, Dinamarca, Suecia, República de Corea y Vietnam con una capacidad instalada por debajo de los 8000 MW (IRENA, 2020).

Energía Eólica en América

El continente americano conformado por América del Norte, América del Sur y América Central, aloja datos hasta el 2020 como los que se observa en la Figura 7 con una capacidad instalada de 165872 MW (IRENA, 2020).

Figura 7*Capacidad Instalada en Energía Eólica en el Continente Americano*

Nota. Se observa la capacidad instalada en MW hasta el año 2020 en el continente americano conformado por América del Norte (139448 MW), América del Sur (24493 MW) y América Central (1931 MW). Recuperado de (IRENA, 2020).

Energía Eólica en América del Norte.

De acuerdo con los datos de (IRENA, 2020), el continente norteamericano con 139448 MW hasta el año 2020, destaca países que lideran esta lista como el caso de Estados Unidos con una capacidad instalada de 117715 MW en tecnología onshore. Estados Unidos tiene parques eólicos entre los de mayor producción en el mundo, por ejemplo, el Centro de Energía Eólica Alta con una capacidad de 1500 MW localizado en California, el Parque Eólico Shepherds Flat con una capacidad de 845 MW localizado en Oregón, y el Parque Eólico Roscoe con 781MW de capacidad en Texas.

Por su parte Canadá con 13577 MW de capacidad instalada cuenta con un ritmo de crecimiento en la capacidad de energía eólica que se ha ralentizado en los últimos años, pero continúa aumentando y se prevé que mantenga dicha tendencia en el futuro. Las principales provincias por capacidad instalada

son Ontario, Quebec y Alberta (Campilla, 2020). Finalmente México con una capacidad instalada de 8128 MW ha tenido cierta desaceleración en el sector eólico por razones políticas (LATAM, 2021).

Energía Eólica en América Latina

Según (CAF, 2015) en la última década la preferencia por el uso de energías renovables ha ido en aumento, que superan expectativas que se han ido planteando años atrás en diversos escenarios energéticos. Por tal razón la energía eólica en América Latina se deriva en 3 aspectos claves:

- La tecnología del viento tiene una gran competitividad económica, pero la expansión del parque eólico latinoamericano ha sabido responder muy bien. Los costos de inversión de energía eólica han ido disminuyendo en los últimos años de esta década debido a la competencia entre la cantidad de productores y las economías de escala que han sido generadas por la demanda mundial. Un notorio ejemplo observamos en el año 2009 cuando los costos rondaban los 1900 dólares por KW y en el año 2013 se redujo a 850 dólares por KW. Dichos avances han hecho que los costos de generación se reduzcan para que actualmente la energía eólica onshore sea considerada competitiva en cuanto al costo en relación a plantas de carbón o a gas en mercados de la región.
- Los avances en la tecnología han permitido el desarrollo de la energía eólica e incrementar los factores de carga, tamaño, potencia y la complejidad de los sistemas.
- Las políticas de introducción a las energías renovables han permitido la rápida incursión de la energía eólica en América Latina. Las matrices de adopción de generación eléctrica es uno de los principales objetivos económicos y políticos de la región, así como también la aplicación de normas de cartera y la introducción de tarifas de alimentación.

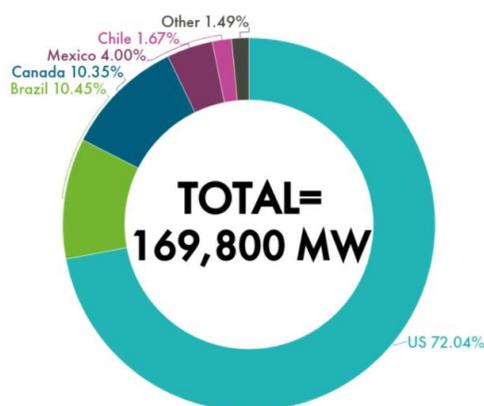
El mayor campo eólico de América Latina se encuentra en Brasil conocido como el complejo Campos Neutrais, situado en el estado de Rio Grande do Sul, compuesto de tres parques eólicos con la capacidad de producir energía para 3.7 millones de habitantes generando 9000 empleos y con una capacidad instalada de 583 MW (Structuralia, 2015).

Una distribución porcentual de los países que sobresalen en la producción de energía eólica en América se observa en la Figura 8. Según datos de (IRENA, 2020) América Central y el Caribe dispone una capacidad instalada de 1931 MW hasta finales del 2020, destacando a países como Costa Rica con 393.5 MW, seguidos de República Dominicana con 370.3 MW, Panamá con 270 MW, Honduras con 241.3 MW y Nicaragua con 186.2 MW de capacidad instalada en tecnología onshore.

América del Sur por su parte dispone de una capacidad instalada de 24493 MW hasta finales del 2020, y se destacan países como Brasil con 17198 MW, seguidos de Argentina con 2624 MW, Chile con 2149 MW, Uruguay con 1514 MW y Colombia con 510.4 MW de capacidad instalada en tecnología onshore (Sputnik, 2021).

Figura 8

Instalaciones Eólicas en América y el Caribe al finalizar el 2020



Nota. Se observa las instalaciones eólicas acumulativas en América y el Caribe al finalizar el año 2020.

Recuperado de (LATAM, 2021).

Energía Eólica en Ecuador

De acuerdo a información del Atlas Eólico del Ecuador del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR) el 52% del potencial de viento del país se encuentra en la provincia de Loja. Las centrales eólicas que resaltan en Ecuador se observa en la Tabla 4

Tabla 4

Principales Centrales Eólicas en Ecuador hasta el 2021

Central	Tipo	Sistema	Potencia Nominal Servicio Público MW
San Cristóbal	Eólica	No incorporado	2.4
Baltra	Eólica	No incorporado	2.25
Villonaco	Eólica	Sistema Nacional Interconectado	16.5

Nota. Se aprecia la potencia en MW de las 3 centrales eólicas que sobresalen en Ecuador. Recuperado de (MERNNR, 2021).

El Parque Eólico San Cristóbal opera desde el año 2007, con una capacidad de 2.4 MW está formado por tres aerogeneradores ubicados en el cerro el Tropezón (zona alta) y con una penetración de generación anual de 21.50 % a la demanda de la isla (ELECGALÁPAGOS, 2021).

El parque eólico Baltra opera desde el año 2014, con una capacidad de 2.25 MW está formado por tres aerogeneradores que se conectan con el sistema eléctrico de la isla Santa Cruz a través del Sistema de Interconexión Eléctrica Baltra – Santa Cruz de 34.5 kV y 50 km de longitud (ELECGALÁPAGOS, 2021).

El parque eólico Villonaco inició su construcción en el 2011 y opera desde el 2013, con una capacidad de 16.5 MW, cuenta con 11 aerogeneradores del tipo GW70/1500 de 1.5 MW cada uno ubicado en la provincia de Loja y es la primera central eólica en el Ecuador continental. Es operada por la Corporación Eléctrica del Ecuador CELECEP, a través de la unidad de negocio CELEC EP – GENSUR, es la

central eólica en territorio continental más importante y que en los 7 años de operación comercial ha aportado al Sistema Nacional Interconectado con 525840.50 MWh de energía, lo que representa la disminución en la emisión de 337647.96 toneladas de dióxido de carbono al medio ambiente. Se encuentra ubicado entre los límites cantonales de Loja y Catamayo en donde la diferencia entre la altura y la temperatura de estas dos poblaciones genera la recirculación del aire a nivel local y también las altas velocidades de viento (CELEC, 2021).

Las ofertas económicas de la empresa española Consorcio Cobra Zero- E Villonaco que incluye el diseño, financiamiento, construcción, operación y mantenimiento de los proyectos de generación eléctrica Villonaco II y III se desarrollará en las localizaciones de Membrillo – Ducal y Huayrapamba en la provincia de Loja y tendrá una potencia nominal de 110 Megavatios con un tiempo de 25 años de concesión. Ambos proyectos gozan del mismo microclima de la central Villonaco I, que en los últimos 5 años de operación registra un factor de planta promedio del 53.7%, con velocidades de viento de 12.4 m/s (Mendoza, 2021).

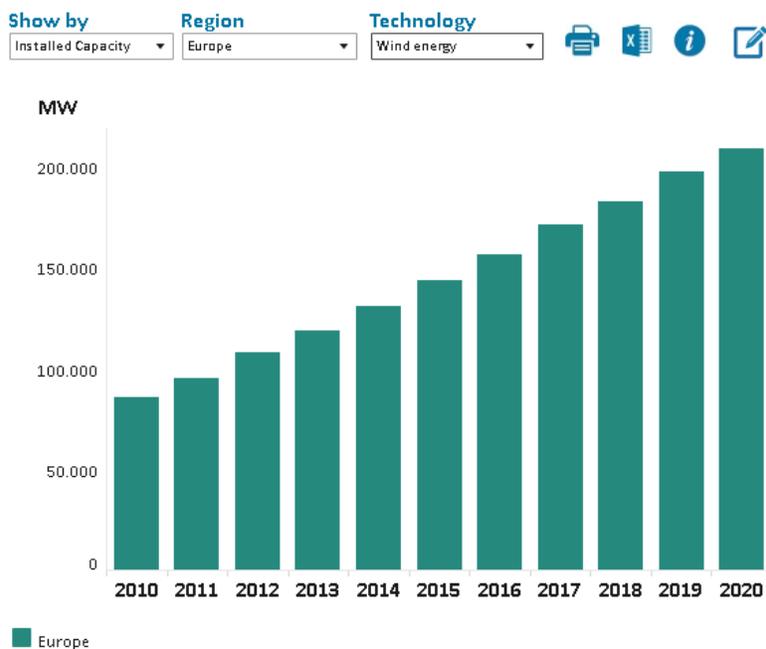
Energía Eólica en Europa

Los países que lideran la producción eólica en el viejo continente son Alemania, España, Reino Unido, Francia e Italia (WindEurope, 2021).

Según datos de (IRENA, 2020), como se observa en la Figura 9, Alemania es el principal país de producción eólica con una capacidad instalada hasta finales del 2020 de 54437 MW, seguidos de España con 27084 MW, Reino Unido con 14102 MW, Francia con 17380 MW e Italia con 10839 MW de capacidad instalada en tecnología onshore.

Figura 9

Capacidad Instalada en Energía Eólica en el Continente Europeo



Nota. Se observa la capacidad instalada de 207560 MW hasta finales del 2020 en el continente europeo. Recuperado de (IRENA, 2020).

Es muy importante resaltar que España en el año 2021 logra su mayor producción eléctrica en los últimos 15 años. Esto se debe a las grandes cantidades de viento registradas desde Enero a Marzo del 2021 que permiten generar más del doble de energía eólica que los registrados en los primeros meses del año 2007 como se observa en la Figura 10 (World Energy Trade, 2021).

Figura 10

Evolución de la producción eólica del 1 de enero al 25 de marzo 2021



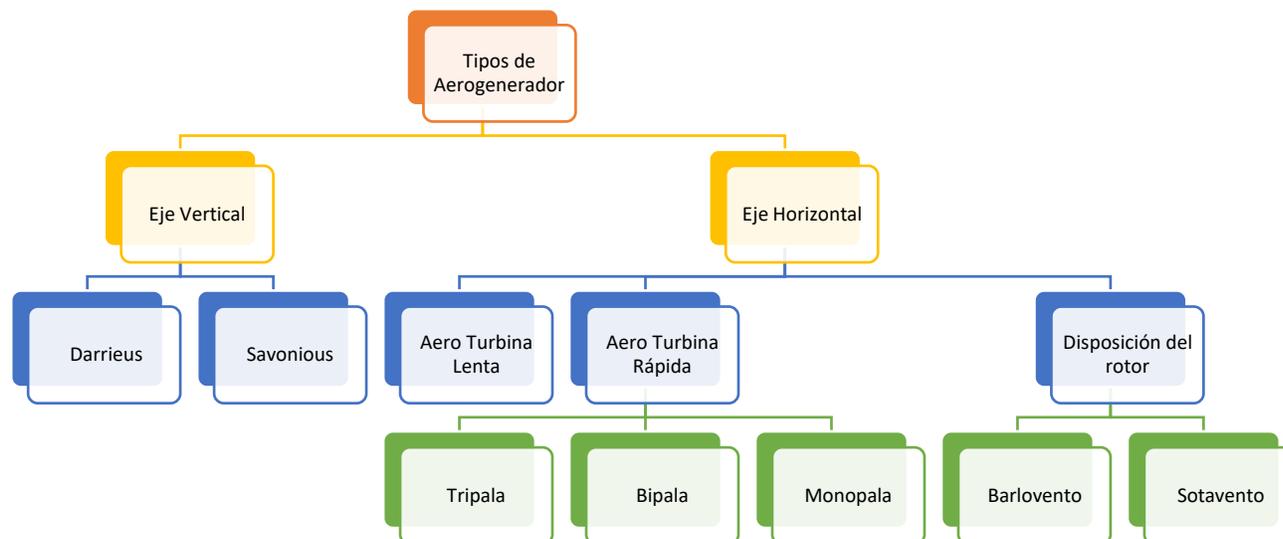
Nota. Se observa la evolución de la producción eólica en España hasta marzo 2021. Recuperado de (Ree, 2021).

España ha aportado 32.9% más energía en su sistema con respecto al año 2020, considerando de esta manera que el 54.6 % de la producción nacional de electricidad sea de origen de fuentes naturales. Se considera también que la energía eólica en este país es la tecnología de generación con más potencia instalada sumando alrededor de 4300 MW de potencia eólica desde el año 2017 (World Energy Trade, 2021) .

Aerogenerador

Es un generador eléctrico que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica a través de una hélice en energía eléctrica gracias a un alternador (Díez, 2002).

En la Figura 11 se ilustra los tipos de aerogenerador existentes.

Figura 11*Tipos de Aerogenerador*

Nota. Se observa una clasificación general de los tipos de aerogeneradores de acuerdo a características principales.

Aerogenerador de eje vertical

De acuerdo a (Structuralia, 2015) se caracterizan porque las palas del aerogenerador giran en torno a un eje dispuesto de manera vertical y presenta ventajas como por ejemplo las siguientes:

- Fácil diseño y ejecución de las palas.
- No precisan un sistema de orientación para captar la energía del viento.
- Se ubica de forma más fácil los componentes para generar la fuerza para su movimiento, generador y transformador respecto al nivel del suelo.

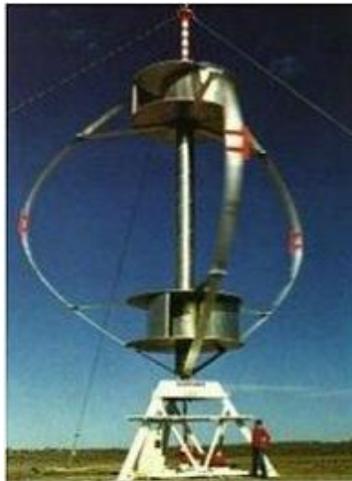
Generalmente estos aerogeneradores tienen un rendimiento muy bajo con respecto a los de eje horizontal (Structuralia, 2015).

Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus

Se caracteriza por tener dos o más palas dispuestas como se observa en la Figura 12. Entre los principales inconvenientes presenta la necesidad de monitorización ya que los perfiles aerodinámicos y la simetría de las palas no permiten el autoarranque. Otro inconveniente a resaltar es la necesidad de tensores que garantizan la estabilidad estructural de la turbina (Giraldo, 2021).

Figura 12

Aerogenerador tipo Darrieus



Nota. Se observa un aerogenerador Tipo Darrieus. Recuperado de (Giraldo, 2021).

Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius

Se caracteriza por tener un bajo rendimiento y baja velocidad de giro, pero si permite el autoarranque (Gentillon, 2009). En la Figura 13 se aprecia este tipo de aerogenerador.

Figura 13

Aerogenerador tipo Savonius



Nota. Se observa la disposición y forma de las palas del aerogenerador de tipo Savonius. Recuperado de (Gentillon, 2009).

Aerogenerador de eje horizontal

Este tipo de aerogeneradores, con disposición de su eje en horizontal, se caracterizan por girar las palas en dirección perpendicular a la velocidad del viento. Se clasifican a su vez en aeroturbinas lentas, rápidas y según la velocidad de giro de sus rotores. (Alcobendas, 2018). Entre las ventajas que presenta este aerogenerador con respecto a los de eje vertical es su eficiencia, es ampliamente probado, es muy utilizado, es más económico y existen muchos modelos. Destacamos entre ellos los siguientes tipos de aerogeneradores:

Aero turbina Lenta

Se caracterizan por tener entre 6 y 24 palas como el de la Figura 14, provocando elevados pares de arranque y una reducida velocidad de giro, son considerados entre sus aplicaciones al bombeo de agua (Structuralia, 2015).

Figura 14*Aero Turbina Lenta*

Nota. Se distingue un ejemplo de aerogenerador de turbina lenta con 15 palas. Recuperado de (Structuralia, 2015).

Aero Turbina Rápida

Son consideradas en este grupo las aero turbinas tripala (3 palas), bipala (2 palas), y monopala (1 pala).

Tripala: Son los más empleados en la actualidad. Consta de 3 palas formando un ángulo de 120° entre sí como se observa en la Figura 15. Son utilizados con fines comerciales y para equipos de alta potencia (López, 2016).

Figura 15*Aerogenerador Tripala*

Nota. En la figura se observa un aerogenerador tripala. Recuperado de (López, 2016).

Bipala: Tienen dos palas como el de la Figura 16. Se caracterizan por necesitar velocidades de giro mayores para producir la misma energía que los aerogeneradores tripala. Poseen un diseño más complejo con la disposición de un rotor basculante y amortiguadores que evita el choque de las palas contra a torre (López, 2016).

Figura 16

Aerogenerador Bipala



Nota. Se observa un aerogenerador bipala. Recuperado de (Veluwemeer, 2021)

Monopala: Se caracterizan por tener una pala y hacen uso de un contrapeso en el lado opuesto de la pala como se observa en la Figura 17. (Thinair, 2010).

Figura 17

Aerogenerador Monopala

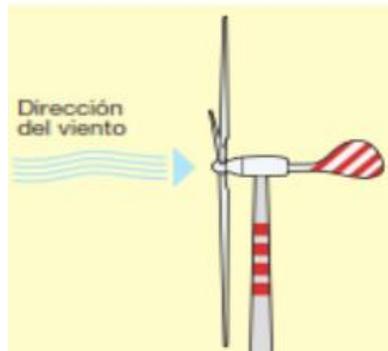


Nota. En la figura se observa un aerogenerador monopala. Recuperado de (Thinair, 2010).

Los aerogeneradores horizontales son muy comerciales, y de acuerdo a la disposición del rotor se caracterizan por ser disposición barlovento, eso ocurre cuando la dirección del viento repercute sobre el rotor y luego sobre la torre como se observa en la Figura 18 (Méndez, 2018).

Figura 18

Barlovento

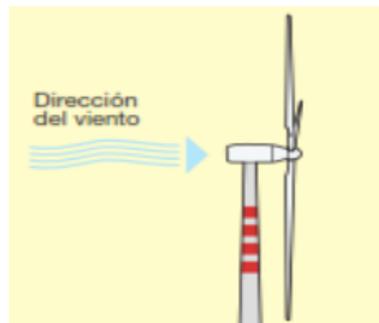


Nota. En la figura se observa un aerogenerador barlovento. Recuperado de (Méndez, 2018).

Cuando la disposición es sotavento quiere decir que el viento incide inicialmente sobre la torre y por último sobre el rotor como se observa en la Figura 19 (Méndez, 2018).

Figura 19

Sotavento



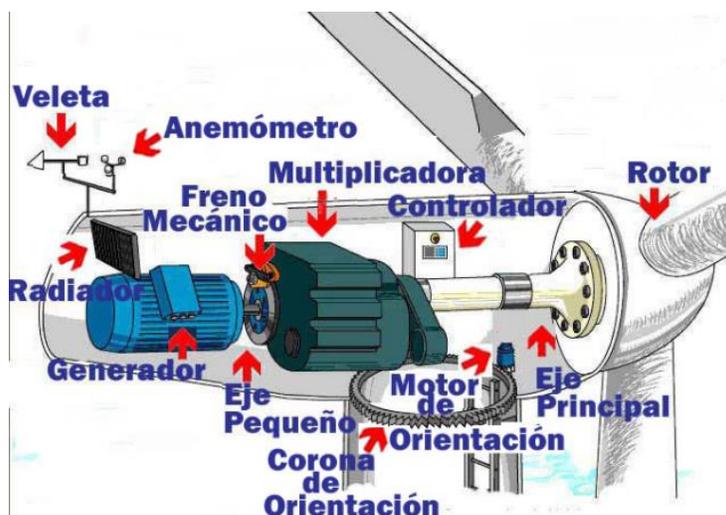
Nota. Se observa un aerogenerador sotavento. Recuperado de (Méndez, 2018).

Principales Componentes de un Aerogenerador

Los principales componentes de un aerogenerador de eje horizontal son descritos a continuación en la Figura 20.

Figura 20

Esquema de un aerogenerador



Nota. Se observa un esquema de las partes de un aerogenerador Tripala de eje horizontal. Recuperado de (Jaramillo A. , 2014).

Torre

Es un componente exterior que soporta a la góndola y el rotor. Tiene una altura aproximada dentro de un intervalo entre 40 y 60 metros. La altura de la torre depende mucho de la cantidad de viento que se observa en el lugar que se ha instalado. Así por ejemplo si es una instalación onshore, es decir sobre la tierra, la góndola generalmente se encuentra a una altura 1 o 1.2 veces el diámetro del rotor como se observa en la Figura 21, mientras que en las instalaciones offshore, es decir en el mar la góndola se encuentra a una altura 0.8 veces el diámetro del rotor (García Garrido, 2019).

Figura 21

Torre



Nota. Se observa la torre de un aerogenerador. Recuperado de (García Garrido, 2019).

Sistema de Orientación de Góndola

De acuerdo a (Jaramillo P. , 2005) son necesarios en las máquinas eólicas de eje horizontal como se observa en la Figura 22. La necesidad de la orientación de este tipo de aerogeneradores es uno de los problemas planteados, esto se debe a la incidencia del viento de manera perpendicular al disco barrido por el rotor, para obtener la máxima potencia y la mayor cantidad posible de aire en movimiento que repercuten en la cantidad de energía cinética.

Figura 22

Sistema de Orientación de la Góndola



Nota. Se observa el sistema de orientación de la góndola de un aerogenerador. Recuperado de (Jaramillo P. , 2005).

Góndola

Es un compartimiento exterior como el de la Figura 23 que contiene el generador eléctrico, la caja multiplicadora y los sistemas de control, regulación, orientación y frenado (Centraleólica, 2018).

Descansa sobre un anillo que gira gracias al impulso de motores que están engranados a una corona dentada y se considere que el plano en el que giran las palas sea siempre perpendicular a la dirección del viento (Centraleólica, 2018).

Figura 23

Estructura exterior de la Góndola



Nota. Se observa la estructura exterior de la góndola de un aerogenerador. Recuperado de (Centraleólica, 2018).

Generador Eléctrico

Es un componente que se encuentra dentro de la góndola como se observa en la Figura 24, que tiene como función convertir la energía mecánica en energía eléctrica proveniente del rotor (Villar, 2017).

Figura 24

Generador



Nota. Se observa la estructura exterior del generador en un aerogenerador. Recuperado de (Villar, 2017).

Anemómetro

Es un aparato meteorológico que sirve para medir la velocidad del viento. Tiene un eje vertical y tres cazoletas o piezas huecas de forma semiesférica que capturan el viento como el de la Figura 25 (Villar, 2017).

Figura 25

Veleta y Anemómetro



Nota. Se observa la veleta y el anemómetro en un aerogenerador. Recuperado de (Villar, 2017).

Sistema de Frenado en un Aerogenerador

Este sistema como el de la Figura 26, garantiza que el aerogenerador pare cuando uno de sus componentes críticos falla o no funciona de manera adecuada. Estos componentes se diseñan para que su vida útil sea de al menos 20 años. Considerar muy importante que el número de paradas de emergencia está entre las 500 y 1000 paradas a lo largo de su funcionamiento. Se destaca el frenado aerodinámico que no ofrece resistencia al viento al girar 90° las palas del rotor. De tal manera las palas se disponen en bandera, haciendo que se frene el aerogenerador de manera suave y sin desgaste de las piezas que actúan en el frenado. Y se destaca también el frenado mecánico que se lo considera como un freno de apoyo al freno aerodinámico y como un freno de estacionamiento para tareas de mantenimiento. Generalmente consiste en un disco con zapatas hidráulicas (Izanda, 2015).

Figura 26

Sistema de Frenado de Aerogenerador



Nota. Se ilustra el sistema de frenado con zapatas. Recuperado de (Izanda, 2015)

Multiplificadora

Es un componente interno como el de la Figura 27, cuyo objetivo consiste en aumentar la velocidad con la que el rotor gira para adaptarla a los valores requeridos por generadores tradicionales.

De esta manera entonces el rotor hace girar un eje lento conectado a una multiplicadora que eleva la velocidad de giro desde unas 10 o 15 revoluciones por minuto a unas 1.500, que es la velocidad más habitual del generador eléctrico. A medida que ha aumentado el tamaño de los aerogeneradores ha ido aumentando la relación de multiplicación necesaria, ya que la velocidad de las palas es menor cuanto mayor es su longitud, siendo más o menos constante la velocidad del generador (Energiza, Funcionamiento de la multiplicadora de un aerogenerador, 2018).

Figura 27

Multiplicadora



Nota. Se aprecia la configuración habitual de la multiplicadora, compuesta de un sistema de ejes planetarios y dos sistemas de ejes paralelos. Recuperado de (Energiza, Funcionamiento de la multiplicadora de un aerogenerador, 2018).

Rotor

Los principales componentes del conjunto rotor son:

- **Palas.-** Son componentes que interactúan con el viento, por lo que su perfil de diseño maximiza la eficacia aerodinámica como las de la Figura 28 (Villar, 2017).

Figura 28*Palas de Aerogenerador*

Nota. Se aprecia las palas de un aerogenerador. Recuperado de (Villar, 2017).

- **Rodamientos de pala.** - Son elementos que se disponen como los de la Figura 29. Tienen como función principal evitar el choque de la pala con la torre del aerogenerador (Villar, 2017).

Figura 29*Rodamientos en Palas del Aerogenerador*

Nota. Se aprecia los rodamientos de pala del aerogenerador. Recuperado de (Villar, 2017).

Buje.- Elemento al que se encuentran unidas las palas como en la Figura 30, y transmite la potencia extraída del viento hasta el componente que multiplica las revoluciones de giro conocido como multiplicadora (Structuralia, 2015).

Figura 30

Buje del Aerogenerador



Nota. Se observa un buje con las palas desancladas. Recuperado de (Structuralia, 2015).

- **Eje Principal.**- Elemento de acero situado entre el buje y la multiplicadora como el de la Figura 31, tiene como función transmitir movimiento entre los dos elementos (Structuralia, 2015).

Figura 31

Eje Principal



Nota. Se observa el eje de transmisión o eje principal de un aerogenerador. Recuperado de (Structuralia, 2015).

Funcionamiento de la Turbina Eólica

Según (Acciona, 2016) , el funcionamiento de los aerogeneradores se describe en la siguiente situación:

- Cada aerogenerador lleva una veleta en la parte superior que le indica la dirección del viento, ello le permite girar sobre la torre y orientarse automáticamente, además para ofrecer la máxima resistencia al viento, las palas giran sobre su propio eje.
- La fuerza del viento o energía cinética contenida en las corrientes de aire hace girar las palas, las cuáles están diseñadas para captar al máximo su energía y poseen longitudes de más de 60 metros de longitud cada pala. Son fabricadas con materiales ligeros y resistentes que pueden producir energía con vientos muy suaves de aproximadamente 11 km/h y cuando llegan a vientos muy fuertes por encima de los 90 km/h las palas se ponen en forma de bandera y el aerogenerador se frena por motivos de seguridad.
- Mediante el buje acoplado al eje lento, las palas se unen al aerogenerador moviéndose a una velocidad entre los 7 y 12 rpm
- Se produce electricidad cuando se aumenta la velocidad a la que gira el eje lento, y dicha acción lo realiza la multiplicadora aumentando la velocidad más de 100 veces y la transfiere al eje rápido.
- El eje rápido que gira a más de 1500 rpm está unido al generador que transforma la energía cinética del eje rápido en electricidad. La electricidad por lo tanto es una energía que se transporta de una manera fácil.
- La electricidad producida por el generador es conducida por el interior de la torre hasta su base, en donde el transformador eleva la tensión para poder transportarla por el parque.
- La corriente alterna es conducida por cables subterráneos hasta llegar a la subestación, lugar en el cual se eleva nuevamente la tensión para incorporarla a la red eléctrica y transportarla hasta los puntos de consumo.

Eficiencia Energética

Es el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la implementación de tecnologías más eficientes, sin afectar a la comodidad y calidad de vida de la población. Desde la perspectiva eólica, es el aprovechamiento máximo de energía sin desperdiciarla por factores varios como calidad y servicio (Energía y Sociedad, 2017).

En el territorio ecuatoriano la eficiencia energética fue muy promovida por el Ministerio del Ambiente, con objetivos políticos en hogares y oficinas, así como también se dio iniciativa para la reducción de gases de efecto invernadero dentro del marco de transformación de la matriz energética del país, estableciendo un equilibrio entre el crecimiento económico y la conservación del ambiente. Es así entonces que en el 2013 el Ministerio del Ambiente publicó una guía práctica para el ahorro y uso eficiente de energía que planteaba ahorrar energía utilizándola de manera consciente y sobre todo usar fuentes renovables (MAE, 2013).

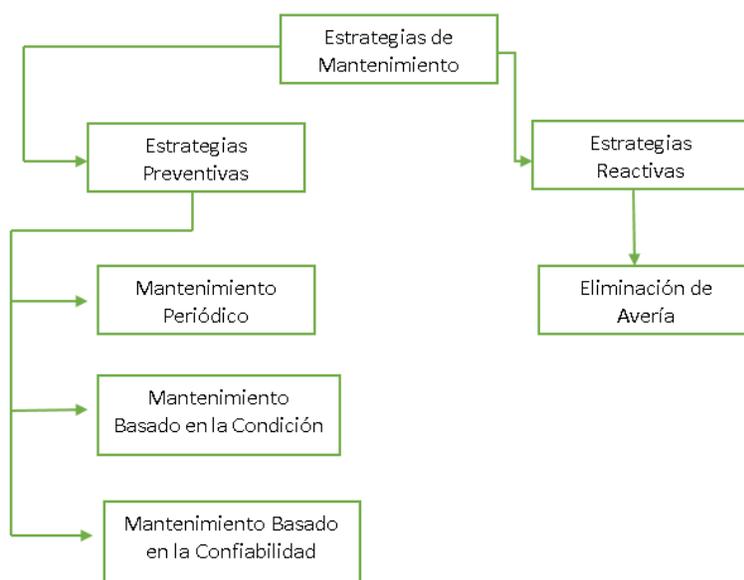
Estrategia de mantenimiento tradicional en aerogeneradores

La estrategia de mantenimiento en la energía offshore se encuentra en evolución; mientras que en la energía eólica terrestre, la estrategia está dominada por el mantenimiento preventivo que tiene mucho que ver con las instrucciones del manual de mantenimiento del fabricante original del aerogenerador pero que se ve afectado por las paradas no programadas (Moreno, 2017).

El mantenimiento tradicional en aerogeneradores se basa en paradas programadas para realizar tareas que tienen que ver con la sustitución de determinados componentes por agotamiento de la considera vida útil que tienen. El mantenimiento actual en aerogeneradores se basa en el análisis de la condición previa que tienen los equipos para la decisión en la toma de acciones que afecten en lo mínimo a la producción (IRIM, 2015). En la Figura 32 se describe las estrategias de mantenimiento tradicional en aerogeneradores.

Figura 32

Descripción esquemática de los diversos tipos de mantenimiento



Nota. Se ilustra las estrategias tradicionales de mantenimiento. Recuperado de (Moreno, 2017).

Estrategias Preventivas

Se entiende como el conjunto de actividades programadas con anticipación para reducir la frecuencia y el impacto de las fallas (Moreno, 2017).

Mantenimiento Periódico

Se define al mantenimiento periódico como aquel que programa el equipo de servicio de la empresa proveedora del aerogenerador. Este mantenimiento es independiente del estado de la máquina; es así entonces que se lo hace dos veces al año en turbinas que usan multiplicadora, con un intervalo de 6 meses. Para máquinas sin uso de una multiplicadora, su mantenimiento es cada 3 meses, que se enfoca en los componentes eléctricos y mecánicos respectivamente. El atraso en los mantenimientos es un problema que tienen en común las empresas de servicios por lo que efectúan un

mantenimiento “Combinado” o “Combo” el cual es un resumen de los dos que se efectúan una vez al año, el cual no es permitido y solo se efectúa con autorización del dueño de la turbina. (López, 2016).

Mantenimiento Basado en la Condición

El mantenimiento basado en la condición mide el desgaste de los componentes de la turbina. Esto se practica con un monitoreo continuo, donde se pueden medir las diferentes variables que dan la información del funcionamiento de los elementos del aerogenerador, por ejemplo, el software de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) instalado en cada aerogenerador. Otro ejemplo es el sistema de control monitoreado (CMS), el cual hace uso de sensores distribuidos y ubicados en los principales elementos del aerogenerador para realizar un análisis de frecuencia, comparando con la frecuencia estándar del elemento en análisis. Se elabora un informe cada 3 meses y será dado al departamento de mantenimiento para que, en el mantenimiento periódico sea revisado o corregido, según sea el estado del componente o de la pieza (Moreno, 2017).

Mantenimiento Basado en la Confiabilidad

El Mantenimiento basado en la confiabilidad se basa en el análisis de fallas potenciales que presenten los componentes del aerogenerador tomando como opción las nuevas tecnologías de información (IT) para hacer un estudio por medio de un formulario de mantenimiento y reparación. Los formularios de mantenimiento hacen énfasis en características de trabajos de una empresa contenida toda la información sobre el componente, tiempo de inactividad, posible falla, repercusión sobre la máquina o funcionamiento de la misma (Y. D. Pernia Mora, 2013).

Estrategias Reactivas

Consiste en la eliminación de las averías. Así por ejemplo el 60% de las averías se encuentran en el sistema mecánico como engranajes y cojinetes, ya sea por la rotura o el desgaste del material, mal

uso de aceite, aceite a altas temperaturas, vibraciones, etc. La altura a la que están colocados los aerogeneradores, hacen que estén propensos al impacto de un rayo en la estructura del sistema, creando un arco eléctrico que se extiende por todos los componentes del aerogenerador, que llega a temperaturas de hasta las 30000 °C , de esta manera dichos problemas atmosféricos representan el 20 % de los daños ocasionados en los aerogeneradores (López, 2016).

Ciertas estadísticas indican que anualmente caen 10 rayos en las palas del aerogenerador. En los sistemas mecánicos alojados en su interior, se maneja hasta 400 litros de aceite de lubricación, los cuales pueden llegar a provocar incendios que representan el 7% de las averías, producto de los rayos, cortocircuitos y generación de chispas que en una labor de mantenimiento es muy difícil tener acceso a la góndola a dicha altura, razón por la cual la pérdida de este aerogenerador representa costos muy elevados. La fatiga de materiales es un deterioro lento desarrollada por las tensiones que se dan en los sistemas mecánicos, notándose daños por compresión o impacto en los sistemas de engranajes. Los engranes, rodamientos, sistema de orientación de palas y góndolas tienden a la abrasión, adhesión, y desgaste conocidos como fenómenos tribológicos. Las reacciones físico-químicas como la corrosión de la estructura metálica del sistema y deterioros de polímeros manifestados por la exposición al sol afectan a sistemas hidráulicos, aislamiento de cables, y otras partes metálicas (López, 2016).

El árbol Jerárquico de activos de un parque eólico

Consiste en clasificar a los activos de una instalación eólica, agrupándolos en base a una jerarquía, donde se considera una visión estructurada de todos los activos que componen la planta, que permiten aprovechar ventajas como la facilitación en la búsqueda de un activo para realizar una tarea de mantenimiento en particular y la elaboración de un plan de mantenimiento para el parque eólico. Otra ventaja son indicadores como costos, disponibilidad, estadística, órdenes de trabajo aportan realmente para la toma de decisiones (Energiza, El árbol jerárquico de activos, 2018).

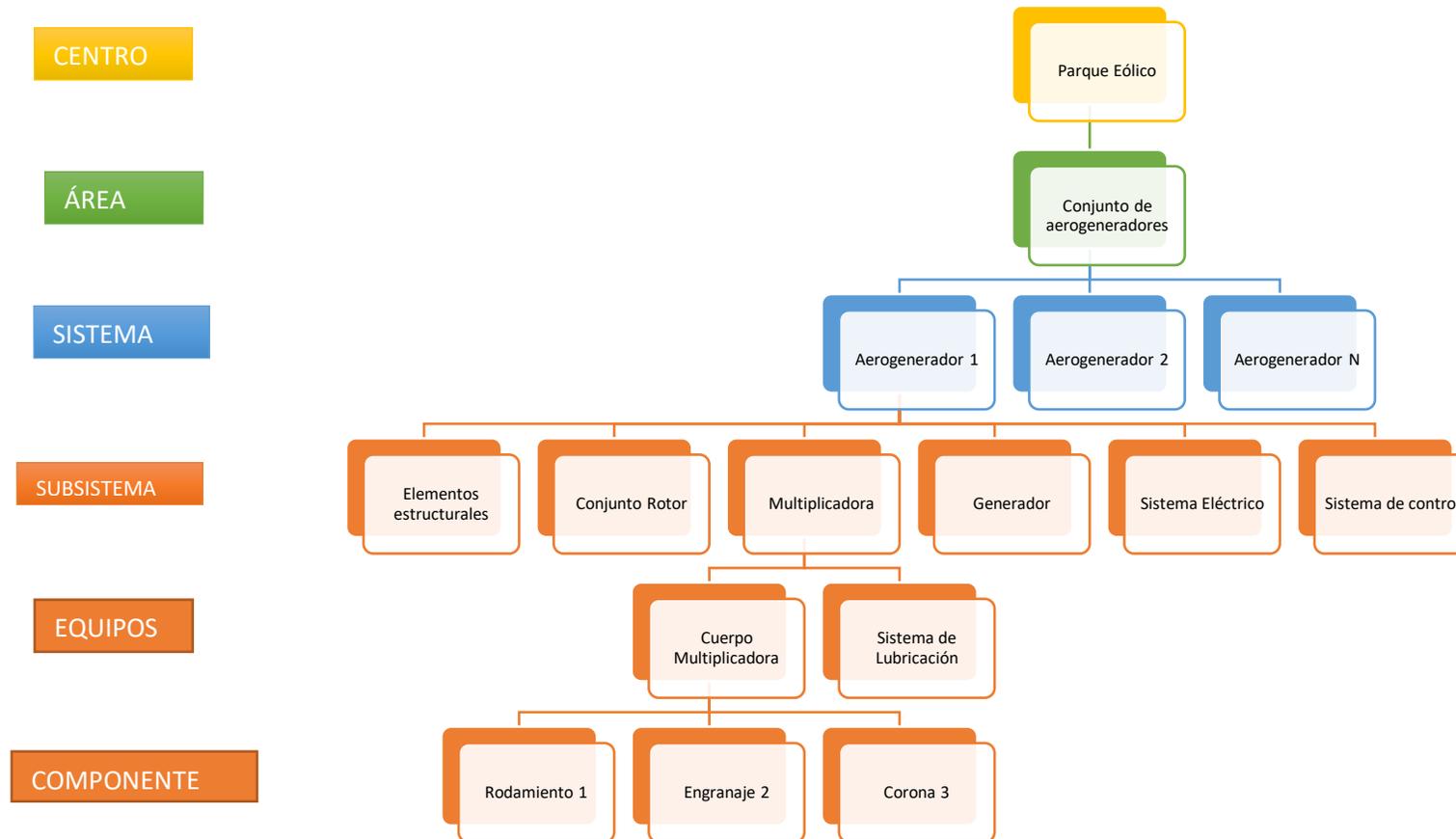
Niveles Jerárquicos

Son un conjunto de ítems que componen la instalación eólica en base a un criterio de clasificación. Son seis niveles jerárquicos: Centro o parque, área, sistema, subsistema, equipo, componente o repuesto como se observa en la Figura 33 (Renovetec, 2018).

De acuerdo al Instituto Renovetec de Ingeniería del Mantenimiento (IRIM) y la norma ISO 14224; los niveles jerárquicos son compatibles con los datos de estructuración jerárquica (Renovetec, 2018).

Figura 33

Árbol jerárquico de parque eólico



Nota. Se observa la estructura jerárquica de un parque eólico. Recuperado de (Renovetec, 2018).

Técnicas de Diagnóstico Online

Consiste en realizar un diagnóstico a partir de los datos obtenidos en línea de instrumentos colocados en el sistema de control que llegan a los responsables que realizan las lecturas directas (Marrero, 2019).

La lectura puede ser en campo mediante las indicaciones de los instrumentos que se utilizan para analizar los datos de una manera más compleja y detallada. Los datos también pueden ser capturados manualmente en la sala de control con la ventaja de la comodidad para realizar la toma (Marrero, 2019).

Otra forma de capturar los datos es de manera automática conocido como el principio de data loggers, los cuales están conectados a los instrumentos y se mantienen conectados el mayor tiempo que puedan almacenando datos para su análisis posterior. Y el caso más complejo y eficaz es en la inversión de equipos y en el desarrollo de software para el análisis matemático de los datos de forma automática a partir de la sala de control (Marrero, 2019)

Protocolo IRIM 202410

Editado en el año 2017, muestra las tareas mínimas a desarrollar en un aerogenerador independientemente de la marca a la que pertenezca (Renovetec, 2018).

El mantenimiento se basa en una inspección trimestral del aerogenerador, busca además evitar la constante subida a la multiplicadora que implica el paro del aerogenerador con una inspección semestral (Renovetec, 2018).

Una de las bases del protocolo es que todas las tareas se desarrollan por profesionales electromecánicos con conocimientos en instrumentación (Renovetec, 2018).

Existen dos tipos de inspecciones basadas en su periodicidad, una de ellas que se hace trimestralmente con 3 horas aproximadas de trabajo por aerogenerador con una inspección visual de puntos dentro de la góndola, en torre, e incluso en la cimentación (Renovetec, 2018).

La otra inspección es de carácter anual, se lo hace con tal frecuencia ya que los fallos que son capaces de detectar tienen un periodo de generación mucho más largo (Renovetec, 2018).

Técnicas de Diagnóstico Offline

Tiene como base fundamental el mantenimiento basado en la condición mediante la observación de los equipos que permite determinar el estado de los componentes y considerar si es importante intervenir o no en el mantenimiento (Marrero, 2019).

Se hace una orden de trabajo para la intervención programada de un grupo de técnicos en el que menos incidencia tenga en la producción en aspectos como la limpieza, ajustes y lubricación de componentes (Marrero, 2019).

Industria 4.0

Se trata de la digitalización de la industria en todos los procesos que dispone la empresa para aprovechar al máximo la tecnología (ISOTools, 2018).

Esta industria inteligente, considerada como la cuarta revolución industrial, tiene como objetivo transformar a la empresa en una organización inteligente para conseguir los mejores resultados del negocio (ISOTools, 2018).

Estamos en un cambio basado en la adopción de nuevas tecnologías para la progresiva automatización del proceso de producción (ISOTools, 2018).

En un futuro no muy lejano observaremos la integración de lo físico con lo virtual en un intercambio de información entre las empresas y las máquinas con procesos optimizados automáticamente (ISOTools, 2018).

El concepto de Industria 4.0 representa un salto muy importante en las organizaciones para considerar sistemas que faciliten la gestión y operación de la información con un gran ancho de banda e infraestructura de tecnología de la información (ISOTools, 2018).

Se considera como una revolución industrial al mencionar la fusión de los planos físico y digital, donde la presentación de la información es muy comprensible a los usuarios apoyados en la automatización de procesos de mantenimiento como el esquema digital que se observa en la Figura 34. El gran reto entonces para las empresas no está en lo tecnológico, la mayor dificultad está en saber gestionar el cambio a la industria 4.0 para aprovechar al máximo las oportunidades que nos ofrece este concepto (CIC, 2017).

Según (Wright, 2020) la Industria 4.0 es conocida como Smart Factory en donde los conceptos de productividad y eficiencia son indispensables para el éxito de la empresa. Consiste en romper paradigmas para optimizar recursos con estrategias efectivas de negocio que permitan reducir costos, eliminar desperdicios, y considerar maquinaria y herramientas para dar respuesta a esta era digital.

- Existe un mejor cuidado del medio ambiente al tener una mejor eficiencia con el uso de recursos.

Entre las desventajas destacan las siguientes:

- Algunas de las tecnologías con las que se venían trabajando quedan desactualizadas ya que no están preparadas para estos cambios tecnológicos y digitales.
- Es necesario un personal especial que controle los procesos de automatización.
- El costo de inversión inicial es muy elevado, pero hay que considerar que a largo plazo dicha inversión es recuperable.
- Existe un desbalance tecnológico entre empresas asociadas, entre las cuales algunas se acojan al cambio tecnológico mientras otras empresas no lo hagan.
- El proceso es muy dependiente de la tecnología, por lo que si ésta falla se debe solucionar de forma inmediata y no perjudicar a la industria.
- La actualización de la tecnología se debe mantener de manera constante para no perder información.

Industria 4.0 y el Mantenimiento

El mantenimiento juega un papel importante en la cuarta revolución industrial, en la medida que trabaja con los principios de anticipación, eficiencia y eficacia de la fábrica inteligente.

Para (Ballesteros, 2017) no es algo nuevo monitorizar las máquinas, pero en el contexto de la Industria 4.0 dicho proceso permite obtener datos que se generan por sensores que se incorporan a la máquina. Con técnicas adecuadas de modelado y procesamiento permiten que los datos sea

información útil que da una gran relevancia al proceso de mantenimiento, de manera especial el mantenimiento predictivo. Así entonces los desarrollos tecnológicos de la Industria 4.0 permitirán hacer posible la integración total de la cadena de valor desde el cliente que interviene en el diseño del producto hasta la posventa mediante sistemas tecnológicos, versátiles e inteligentes.

Según (Valuekeep, 2021) la industria 4.0 tiene como desafío encontrar maneras de interconectar los procesos existentes mediante el uso de tecnología que sirve de elemento conector de las máquinas, personas, equipamientos y operaciones; cuyo objetivo es realizar un mantenimiento más simple y sencillo de controlar y acompañar operaciones y considera importante desarrollar conceptos claves como los siguientes:

- **Mantenimiento Preventivo:** Realizado de modo sistemático, es decir los componentes son inspeccionados así no se evidencie avería. Esto se hace con el fin de evitar cualquier fallo y garantizar el funcionamiento y seguridad de los componentes.
- **Mantenimiento Predictivo:** Es el análisis de datos recopilados por sensores y otras tecnologías para evaluar un conjunto de parámetros determinados y prever comportamientos futuros.
- **Big Data:** Describe el gran volumen de datos estructurados y no estructurados de las empresas. Estos datos se reportan en información dadas por máquinas, sensores, cámaras, micrófonos, teléfonos y equipos que pueden provenir de fuentes, como redes sociales, empresas, proveedores y clientes.

Con algoritmos avanzados se realiza el análisis de los datos considerados como pieza importante para la toma de decisiones en tiempo real, y alcanzar altas condiciones de calidad de producto y procesos.

- **Inteligencia Artificial:** En el área de mantenimiento se destacan robots que colaboran con humanos, drones de inspección, y robots de limpieza.

El desarrollo de algoritmos es la base de la inteligencia artificial que permiten al computador procesar datos a altas velocidades con respecto a tradicionales que requería varias personas y computadoras logrando un aprendizaje automático.

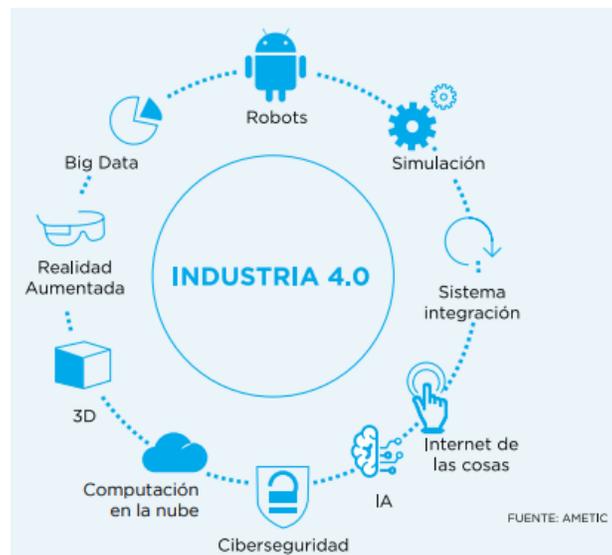
Industrialmente permite el desarrollo de modelos neuronales aplicables en el procesamiento de imágenes que refuerza la seguridad y el control de calidad.

- **Internet de las cosas:** Por sus siglas en inglés IOT, tiene que ver con la capacidad de asignar a aparatos y componentes una conexión permanente a internet para el intercambio de información en tiempo real.
- **Computación en la Nube:** Es la provisión de servidores, almacenamiento, banco de datos, red, software por internet (nube), con el fin de ofrecer innovaciones más rápidas.

Puede expresarse en tres niveles diferentes, de acuerdo al software e infraestructura como servicio y plataforma.

Esta tecnología ofrece agilidad y permite a las empresas acceder de una manera flexible a los recursos informáticos con un bajo esfuerzo de la parte administrativa y desde distintos dispositivos.

De acuerdo a (Basco, 2018) la Industria 4.0 es la fase de la digitalización con pilares tecnológicos que se observa en el esquema de la Figura 35 implementadas en el sector manufacturero e impulsada por el aumento de volúmenes de datos, la conectividad y la potencia de los sistemas computacionales.

Figura 35*Pilares tecnológicos de la Industria 4.0*

Nota. Se observa los pilares tecnológicos de la industria 4.0. Recuperado de (Basco, 2018).

- **Sistemas de Integración:** Integra las tecnologías operacionales con las tecnologías de información y comunicación con las conexiones máquina – máquina, máquinas – productos, que tienen un alto impacto en la gestión interna de la empresa.

Con el uso de plataformas digitales permite la conexión entre la empresa con proveedores, logística, transporte y clientes.

- **Máquinas y sistemas autónomos (Robots):** Tiene como objetivo incrementar la robótica colaborativa para trabajar de forma automatizada en las diferentes áreas de la empresa.

Por ejemplo, algunas empresas inteligentes hacen uso de vehículos de guiado automático (AGV) que transportan productos de peso considerable de una estación a otra.

- **Manufactura aditiva:** Consiste en la fabricación de piezas desde un modelo virtual con capas de diversos materiales. Al hablar de impresión 3D se puede dar a detalle un ejemplo en la industria

aeronáutica de impresión de piezas más ligeras que las tradicionales que facilitan el ahorro de combustible en los aviones por el menor peso de los aviones.

- **Ciberseguridad:** Es muy fundamental para el resto de tecnologías para la incursión hacia el mundo digital.

Datos e información en internet obliga a desarrollar mecanismos de ciberseguridad en las industrias que tienen como objetivo detectar, anticipar y neutralizar amenazas sobre los sistemas de información de las empresas.

- **Simulación de Entornos Virtuales (Realidad Virtual):** Reemplaza lo real por un contenido 100% virtual, es decir se considera como una tecnología que permite ingresar a escenarios, juegos, ambientes en donde el usuario realiza acciones, movimientos e interactúa con el contenido digital de forma completamente inmersiva.

Es necesaria para ajustar y representar de manera virtual el funcionamiento de procesos, personas y máquinas en tiempo real antes de ser ejecutados con el fin de prevenir averías, reducir tiempos, y evaluar el resultado final que permite reducir costos relacionados a trabajos de aprendizaje de prueba de error con la representación virtual de las distintas configuraciones en la operación de la planta productiva.

Un claro ejemplo se tiene que los operadores pueden probar distintas configuraciones hasta lograr una óptima configuración virtual que será puesta en práctica en la línea física de producción. Los intercambios de experiencias obtenidas en el mundo real permitirán la mejora del entorno virtual y una colaboración entre la planta física y su representación virtual.

Según (Facultad Informática de Barcelona, 2021) la realidad virtual es un sistema que genera en tiempo real representaciones de la realidad que no tiene ningún soporte físico y que se da en el interior

de ordenadores. La simulación de la realidad virtual se refiere a escenas virtuales que crean un mundo virtual existente únicamente en el ordenador de lugares u objetos existentes en la realidad. Otra característica primordial es la captación de movimientos reales que permiten ser proyectados en el mundo virtual.

- **Realidad Aumentada:** Proyecta información como textos, imágenes, personajes, gráficos, en el mundo real que facilitan una nueva visión del espacio considerado como físico.

Es la incorporación de elementos virtuales a la realidad. Son sistemas que combinan la modelación, virtualización y simulación con aplicaciones como la selección de piezas de un depósito, instrucciones de reparación de fallas con la capacitación de los recursos humanos en los entornos virtuales que simulan la realidad de la planta.

Según (RocketContent, 2021) la realidad aumentada asigna la interacción entre ambientes virtuales y el mundo físico con la posibilidad que se entremezclen mediante el uso de webcams, teléfonos móviles, tabletas, entre otros dispositivos tecnológicos.

Entre las características de la Realidad Aumentada se consideran:

- Combinación del mundo virtual y real.
- Ofrecer en tiempo real una interacción inmersiva.
- Adaptación con el entorno puesto en marcha.
- Interactuar con el entorno 3D.

Aplicaciones de la Realidad Virtual y la Realidad Aumentada en la Industria 4.0

Según (Innoarea Projects, 2021) entre las aplicaciones que se destacan de estas tecnologías son:

Optimización de Diseños: Los procesos de fabricación de artículos de plástico, metal, o cerámica conocidos como el prototipado industrial requiere de altos costos de inversión, por lo que es necesario crear de manera física los productos para apreciar sus características y diseño. Pero con la llegada de la realidad virtual se reducen los costos derivados de las tareas de modelados ya que ésta tecnología permite la creación del producto en una simulación cercana a la realidad para analizar sus características y diseños.

Por otra parte, la realidad aumentada es útil para el montaje y diseño de instalaciones ya que es una información extra que se le aparece al técnico en los dispositivos de manos libres para saber si las dimensiones reales de la fábrica en donde se va a instalar el proyecto es considerado adaptable.

Mantenimiento y Control de Planta: Cuando la avería ocurre, normalmente el operario no tiene a mano el manual de instrucciones de la máquina para realizar la operación de mantenimiento, lo que provoca tiempos perdidos al realizar el paro en la producción de la planta hasta encontrar el manual o a un profesional con el conocimiento del funcionamiento de la maquinaria. Con la realidad aumentada el operario se coloca las gafas de visión con las cuales a través de ellas sigue los pasos detallados en las instrucciones virtuales que se le proyectan sobre la lente para resolver la falla.

Entrenamiento de Operaciones y formación de operarios: Con las gafas de realidad virtual es posible colocar a un operario en una simulación de la máquina que ha detenido su producción para que realice las tareas de inspección y mantenimiento pertinentes como si estuviera trabajando en un entorno físico y real de la planta similar al que se observa en la Figura 36.

Por ende, entonces la realidad virtual es una tecnología que permite a las empresas el entrenamiento y formación de sus operarios de una manera óptima y económica eliminando costos de capacitación del personal técnico, se reducen tiempos y se evitan paros de la máquina.

Figura 36

Entrenamiento de operarios asistido por realidad aumentada



Nota. Se observa la resolución de una avería con el uso de gafas de realidad aumentada. Recuperado de (Innoarea Projects, 2021).

Asistencia y resolución de incidencias: La aplicación de tele asistencia por el técnico experto mediante realidad aumentada guían al operario de fábrica durante el proceso de mantenimiento. Con las gafas y la cámara integrada que lleva el operario, la conexión con el servicio técnico del fabricante de la maquinaria es todo un éxito, lo cual supone optimización de los tiempos de producción al evitar paradas con mucha duración hasta que llegue el personal de servicio técnico y también representa un ahorro de costos frente a gastos de desplazamiento, y horas de trabajo de profesionales de servicio de mantenimiento.

Software Utilizado

Simulwind

Es un proyecto que nació en diciembre de 2017 en Europa cofundado con el programa ERASMUS+ y un financiamiento de 272841 euros para la formación de personal y mantenimiento

eólico que presenta un simulador, el cual muestra los principales daños y soluciones en la turbina del aerogenerador (Velásquez, 2019).

Esta herramienta ha sido desarrollada por la empresa MONSUTON que sigue la prioridad de la industria eólica con beneficio a una transformación digital del sector (Velásquez, 2019).

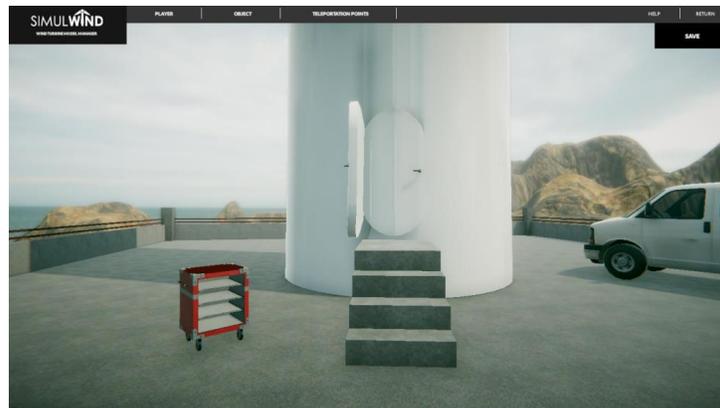
Se satisface algunos desafíos que tienen gran impacto en la operación de parques eólicos tales como la necesidad de personal calificado y nuevos modos de operación que se basan en la extensión de la vida útil y reducción de costos variables (Velásquez, 2019).

El simulador presenta situaciones y casos adquiridos en la vida real para conocer los detalles del aerogenerador antes de trabajar en obra (AEE, 2017).

Funcionamiento

Simulwind trabaja con las herramientas y equipos necesarios para trasladarse al parque eólico como el que se observa en la Figura 37 y acceder al aerogenerador para identificar los componentes con los que se desea interactuar, apoyados en instrucciones secuenciales de inspección, interacción, tele transporte, combinación de herramientas con materiales y equipos de protección personal como se requiera en la programación (AEE, 2017).

El funcionamiento se basa en el entorno de realidad virtual que muestra la sala de mantenimiento en un aerogenerador tripala de eje horizontal con los detalles propios de un modelo 3D (AEE, 2017).

Figura 37*Aerogenerador en Simulwind*

Nota. Se observa el entorno virtual del aerogenerador. Recuperado de (Simulwind, 2017)

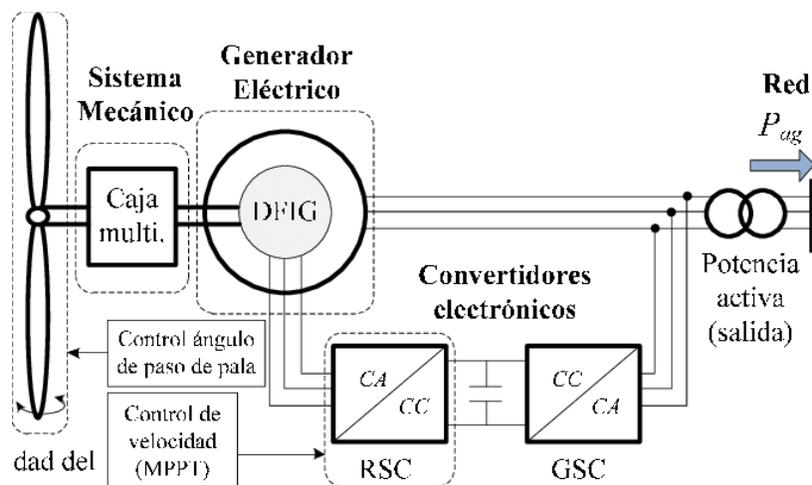
Modelo de Aerogenerador

El modelo de aerogenerador está basado en un diseño típico que utiliza un generador de inducción de doble alimentación (DFIG) que según (Vilaragut, 2014) es considerada como una máquina de inducción de velocidad variable formada por el circuito del estator que se conecta directamente a la red y formada también por el circuito del rotor, que se conecta a la red mediante un convertidor AC/DC/AC como se observa en la Figura 38.

Dispone de un campo de velocidades limitado entre -50% a +30% alrededor de la velocidad sincrónica. Un convertidor de energía a escala reducida, lo cual supone bajas pérdidas de energía y un bajo precio. El control de la energía activa y reactiva es completo y necesita un colector de anillos y caja de engranajes (Vilaragut, 2014).

Figura 38

Generador de inducción de doble alimentación



Nota. El generador de inducción doblemente alimentado utiliza un convertidor de energía a escala reducida. Recuperado de (Ochoa, 2016).

El modelo de aerogenerador en el simulador como el que se observa en la Figura 39 es un modelo genérico que dispone de una estructura clásica de marco principal, actuador de paso, acceso a la torre y guiñada activa que es el movimiento circular *yaw* que consiste en un giro en el mismo ángulo que el eje normal de la torre que posicione al aerogenerador frente al viento (Simulwind, 2017).

Figura 39

Modelo de Aerogenerador



Nota. Se observa el modelo aerogenerador usado en el simulador. Recuperado de (Simulwind, 2017).

Términos de Uso y Licencia

Esta licencia se refiere a la versión 3 de la GNU que es un sistema operativo de tipo Unix y una gran colección de programas informáticos, es decir utiliza la licencia pública general diseñada para garantizar la libertad de distribuir copias de software gratuito y cobrar para ellos si lo desea (BZEE, 2017).

De esta manera, al ser un software gratuito, las contraseñas y usuarios asignados a los correos electrónicos de las personas deben ser protegidos por los dueños con el fin de respetar la creación de tareas de mantenimiento, programación de acciones, puntos de transporte, manejo de herramientas requeridas, objetos de interacción y pasos secuenciales que cada uno de los usuarios lo requieran a su conveniencia (BZEE, 2017).

Además se indica con lo anterior que el proceso de mantenimiento realizado en una computadora de uso personal de acuerdo a su programación es muy diferente al proceso de simulación de otro dispositivo de simulación con distinto usuario y distinta contraseña (BZEE, 2017).

Capítulo III

Metodología

El presente trabajo de titulación utiliza un desarrollo iterativo e incremental por lo que el proyecto se planifica en diversos bloques temporales. Al hablar de iteraciones se trabaja en mini proyectos para proporcionar un resultado completo al trabajo final. En cada iteración se busca mejorar las condiciones de tareas, mejorando las ideas a medida que se van completando los mini proyectos en función a los resultados que se van obteniendo.

Con el fin de obtener diversos beneficios según (Cobo, 2017) se destacan los siguientes:

- Aumento de expectativa, ya que el usuario no sabe lo que necesita conforme va viendo los resultados del proyecto.
- Con las primeras iteraciones se puede obtener datos importantes para la elaboración de la siguiente iteración.
- Se tiene un acceso más cómodo a la simulación para elaborar cambios minúsculos en cada iteración.
- Se gestiona la complejidad de proyecto y se minimiza el número de errores para poco a poco mejorar la calidad.

La metodología iterativa e incremental está compuesta por una fase de formación, una fase de desarrollo y una fase de integración que se observa en la Tabla 5.

La fase de formación consiste en la investigación y estudio de herramientas que componen el simulador de mantenimiento eólico.

La fase de desarrollo consiste en satisfacer los requisitos del proyecto realizando iteraciones con la creación de tareas de mantenimiento en el simulador.

Y la fase de integración consiste en la implementación de las tareas de mantenimiento en el entorno virtual con pruebas de ensayo y error que comprueba el correcto funcionamiento de las implementaciones realizadas.

Tabla 5

Fases dentro del método de Desarrollo Iterativo e Incremental

Fase de Formación	Fase de Desarrollo	Fase de Integración
<ul style="list-style-type: none"> Investigación y estudio de herramientas 	<ul style="list-style-type: none"> Modelo de propuesta de mantenimiento Instalación de Material y creación de tareas de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> Integración final del material Implementación y pruebas

Nota. Se observa el esquema de las fases dentro de la metodología de desarrollo iterativo e incremental. Recuperado de (Cobo, 2017).

Investigación y Estudio de Herramientas

SIMULWIND: Programas y Versiones

Simulwind en su versión 1.38 es un programa de simulación virtual en el mantenimiento de aerogeneradores que al ser descargado viene incorporado con Unity y un archivo ejecutable en Blender (Simulwind, 2017).

Unity en su versión 2018.3.7.1F es el software motor del simulador que viene desarrollado con una serie de rutinas de programación creadas por la empresa MONSUTON que permiten apreciar un entorno interactivo considerado como videojuego o entorno virtual de la sala de mantenimiento propia de los aerogeneradores (Simulwind, 2017).

Por otra parte, Blender en su versión 2.8 viene con la incorporación de un archivo ejecutable con el modelo 3D del aerogenerador tripala de eje horizontal con la inclusión de 50 piezas o bloques. Posee todos los componentes que van a ser montados y desmontados en los procesos de mantenimiento e integra la góndola y el buje localizado en el rotor, que es el encargado de sujetar los álabes y conectarlos con el eje principal del generador eléctrico para visualizarlos de una forma realista con todos los componentes seleccionados, integrados en grupos y subgrupos para el mantenimiento del aerogenerador (Simulwind, 2017).

El anexo A del presente trabajo de titulación presenta el manual técnico de Simulwind, en el cual se observa a mayor detalle las características y herramientas utilizadas por la empresa MONSUTON en el modelado 3D del aerogenerador y el proceso de interacción entre los programas y versiones ya mencionados.

El usuario de Simulwind exclusivamente aprovecha los beneficios desarrollados por la empresa MONSUTON, y procede bajo iniciativa propia la creación e implementación de tareas de mantenimiento bajo el esquema de un nuevo modelo de propuesta de mantenimiento.

Modelo de Propuesta de Mantenimiento Eólico

La competitividad en los procesos de mantenimiento, es una de las razones por el cual el modelo de propuesta tiene que ser eficiente con las necesidades de la empresa en la reducción de costos de mantenimiento.

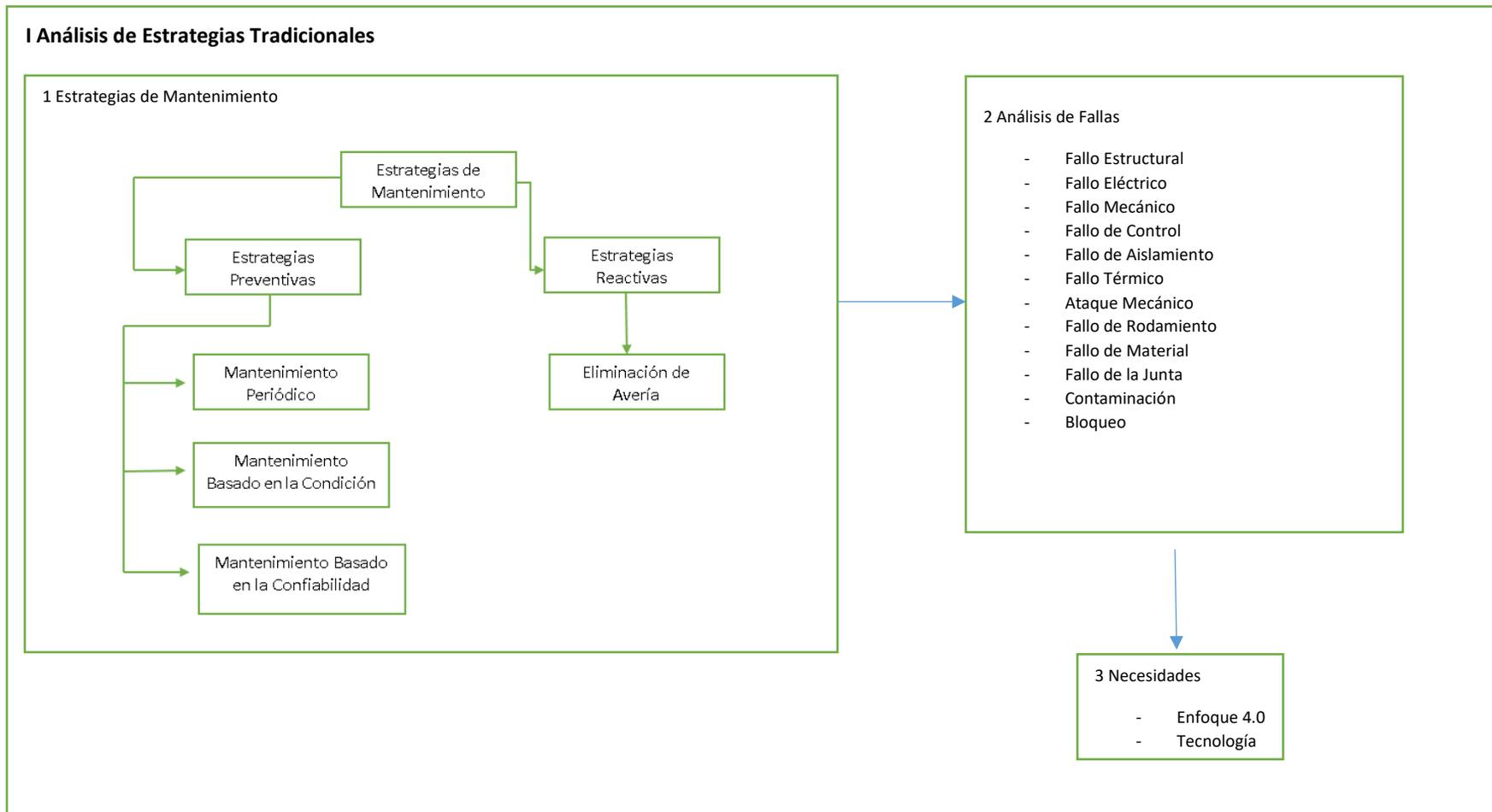
Con la correcta gestión y el eficiente análisis de las necesidades de la empresa, la actividad de mantenimiento requerida garantiza excelentes resultados en los sistemas de producción y en la minimización de costos de la empresa.

Los recursos disponibles en la empresa y su gestión, permiten un modelo eficiente para una planificación adecuada de las áreas de mantenimiento en el trabajo operativo y estratégico.

La estructura del modelo de mantenimiento en la Figura 40 se basa en el análisis de la información obtenida en el mantenimiento operacional de los aerogeneradores en diversos estudios, los cuales presentan problemas tecnológicos y de digitalización.

El modelo presentado es secuencial y ordenado contemplando pruebas que deciden acciones de mayor importancia considerando la seguridad del personal de mantenimiento y operación. Además, el entrenamiento virtual es uno de los principales ejes en la capacitación y formación del personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores.

Figura 40

Estructura del modelo de mantenimiento

II Mejora Continua

4 Capacitación

- Conocimiento en operación y mantenimiento de aerogeneradores que posee actualmente el personal
- Grado de experiencia del profesional del sector eólico

5 Beneficios del TPM

Beneficios en Función a la Organización

- Calidad de ambiente de trabajo y comunicación entre los trabajadores del sector eólico.
- Control en las operaciones de mantenimiento del aerogenerador
- Incremento moral en los trabajadores de la empresa de mantenimiento eólico.

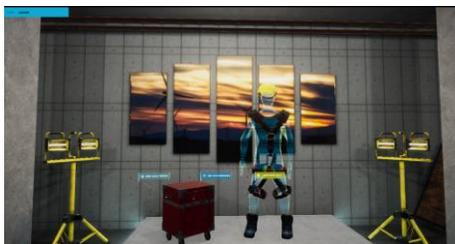
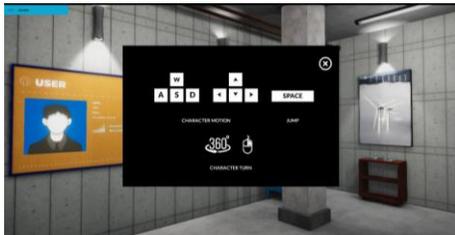
Beneficios en Función de la Seguridad

- Cuidado del medio ambiente con las operaciones de mantenimiento eólico
- Disminución de accidentes laborales en el mantenimiento en la altura de la torre.
- Mantenimiento de componentes bajo el cumplimiento de normas de seguridad

Beneficios en Función de la Productividad

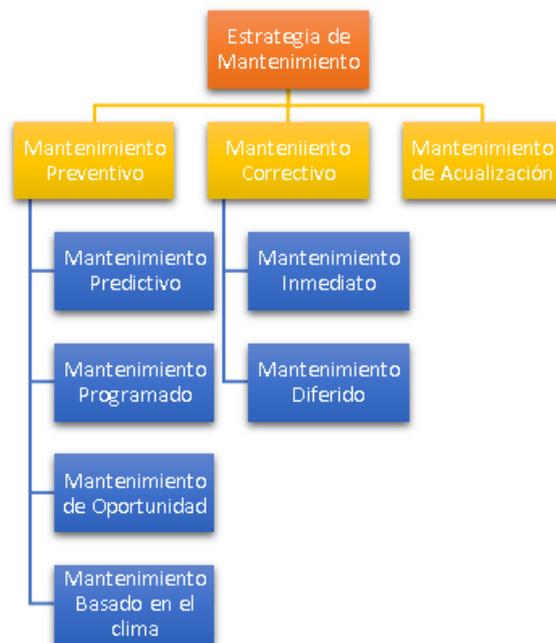
- Fomento en la competitividad de la planta del aerogenerador.
- Satisfacción en el trabajo de operación y mantenimiento eólico con la manipulación de herramientas y materiales
- Reducción en los costos de mantenimiento de los componentes eólicos
- Incremento en la capacidad de solventar fallas en los equipos eólicos

6 Entrenamiento Virtual



III Sustentación de Mantenimiento

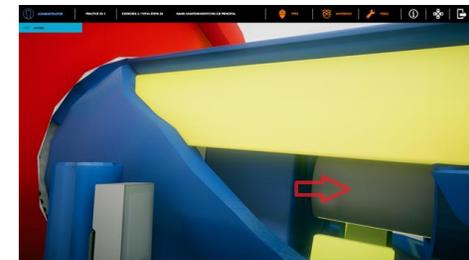
7 Estrategia de Mantenimiento



8 Programación de tareas de mantenimiento basados en la estrategia de mantenimiento en los principales componentes.

- Sistema de Frenado
- Mecanismo de orientación de palas
- Torre
- Multiplicadora
- Generador
- Rotor (Buje y Palas)
- Transmisión Mecánica

9 Ejecución de tareas de mantenimiento



Nota. Se detalla la estructura del modelo de mantenimiento en base al análisis, mejora y sustentación.

Análisis de Estrategias Tradicionales

La primera etapa del modelo consiste en el análisis de las estrategias de mantenimiento tradicionales en aerogeneradores.

De acuerdo a la información en la sección 2.8 del presente trabajo de titulación, se resalta un modelo de estrategia preventiva para reducir la frecuencia y el impacto de fallas. Así como también una estrategia reactiva para eliminar averías que sobresalen en el sistema mecánico.

Se indican en la Tabla 6 los modos de fallo y las causas que los producen.

Tabla 6

Modos de fallo y causas principales en un aerogenerador

Modos de Fallo	Causas raíz de fallo
Fallo estructural	Defecto de diseño
Fallo eléctrico	Defecto de material
Fallo Mecánico	Defecto de instalación
Software o fallo de control	Defecto de mantenimiento
Fallo de aislamiento	Defecto del software
Fallo térmico	Corrosión
Ataque Mecánico	Desalineación
Fallo del rodamiento	Fatiga de bajo ciclo

Modos de Fallo	Causas raíz de fallo
Fractura del componente o fallo del material	Fatiga de alto ciclo
Fallo de la junta	Desgaste mecánico
Contaminación	Falta de Lubricación
Bloqueo	Sobrecarga térmica, sobrecarga eléctrica, incidente meteorológico, incidente de red

Nota. Se detalla los modos de fallo sugeridos y causas principales de un Análisis de Modo y Efecto de la Falla (FMEA) de un aerogenerador. Recuperado de (Moreno, 2017).

Por otro lado el alto riesgo que conlleva trabajar en las alturas con el manejo de grandes pesos con grúas de alto tonelaje, riesgos eléctricos, espacios confinados como aquellos entre el generador, multiplicadora, motores moto reductores de orientación en los cuales existe la posibilidad de atorarse y sufrir accidentes son consideradas actividades de alto riesgo. (López, 2016).

Se analiza entonces en la Tabla 7 las causas de falla que se dan en los principales componentes de los Sistemas de Generación Eólica.

Tabla 7

Causas de falla en los componentes del aerogenerador

SUBSISTEMAS	CAUSAS
Sistema Eléctrico	Por fatiga del componente, mal conexión de cables, consecuencia de otras alarmas, disparo de línea por tormenta eléctrica, contactor defectuoso, reapriete ineficiente de conexiones, mal dimensionamiento de equipos en función de capacidad nominal

SUBSISTEMAS	CAUSAS
Electrónica de Potencia	Contactor defectuoso, tormenta eléctrica, corto en unidad de potencia, fallo encadenado de componentes, sobre tensiones e intensidades de la línea, tormentas eléctricas.
Sensores	Aviso real de alarma, por un mal ajuste del sensor, desajuste del sensor por funcionamiento, condiciones adversas, (temperatura, clima, etc.), mala transmisión por suciedad, baja calidad de los componentes
Sistema hidráulico	Fuga en sistemas de presión y caudal, y principalmente por la degradación del aceite
Sistema de Orientación	Mala información de sensores, sistema de retroalimentación averiado, mal ajuste de referencia, falta de lubricación
Palas – Buje	Condiciones climatológicas, impactos de aves, falta de lubricación del sistema, mala alineación del eje principal
Freno Mecánico	Por falta de lubricación del sistema hidráulico, no rectificación del disco
Generador	Sobre intensidad por variación de carga durante funcionamiento, derivación entre fases, mal conexión de los cables, desgaste de escobillas, contactor del rotor defectuoso, reapriete ineficiente, falta de engrase, mala conexión en los terminales de salida
Multiplicadora	Mala conexión en refrigeración hidráulica y filtros, mala aplicación de pintura anticorrosiva
Góndola	Condiciones climatológicas, derrame de aceites

Nota. Se detalla las causas de falla en los principales componentes del aerogenerador. Recuperado de (López, 2016).

Mejora Continua con un Enfoque a la Industria 4.0

Con el análisis de las estrategias tradicionales, se observa una necesidad tecnológica en el uso de herramientas de entrenamiento virtual en la capacitación de nuevos profesionales de mantenimiento de los componentes del aerogenerador, que permitan alcanzar aceptables índices de aprendizaje y práctica. Dichos valores son muy importantes para solventar fallas humanas que representan riesgos en la producción y costos de la empresa.

El modelo de propuesta tiene una estrecha relación con el enfoque del Mantenimiento Productivo Total (TPM), ya que en la actualidad las industrias son más competitivas tanto tecnológicamente y económicamente, con diversos objetivos relacionados con indicadores como por ejemplo en la Tabla 8 se detallan la reducción de costos, de tiempos, ampliación de conocimiento y capacitación de personal.

Este modelo se distingue por trabajar por el beneficio y eficiencia común de la empresa, con el apoyo y trabajo colectivo de todo el personal técnico y administrativo, con el fin común de evitar cualquier tipo de pérdidas en los departamentos mencionados.

De acuerdo al apartado 2.13.2 del presente trabajo de titulación de las aplicaciones en la industria 4.0, los estudios hechos por (Basco, 2018) indican que la simulación de entornos virtuales permite reducir los costos asociados a procesos de aprendizaje con la representación virtual de la planta de mantenimiento eólica, de tal manera los operadores pueden probar distintas configuraciones hasta lograr el óptimo desarrollo del rendimiento de los equipos e intercambiar experiencias en el mundo real para la mejora de la configuración del entorno virtual.

Por otra parte según (Innoarea Projects, 2021) la realidad aumentada permite el mantenimiento y control de la planta en donde las instrucciones de mantenimiento son guiadas a través de dispositivos virtuales y permiten el entrenamiento de operaciones y formación de operarios. La asistencia guiada por

el técnico experto permite optimizar tiempos de producción al evitar paradas de máquina con larga duración de tiempo.

Tabla 8

Beneficios del Mantenimiento Productivo Total

Beneficios en Función a la Organización	Beneficios en Función de la Seguridad	Beneficios en Función de la Productividad
<ul style="list-style-type: none"> • Mejora en la calidad de ambiente de trabajo y comunicación entre los trabajadores del sector eólico • Un mejor control de las operaciones de mantenimiento del aerogenerador • Incremento moral en los trabajadores de la empresa de mantenimiento eólica 	<ul style="list-style-type: none"> • Operaciones de mantenimiento eólico llevan un cuidado del medio ambiente • Disminución de accidentes laborales en el mantenimiento en la altura de la torre • Mantenimiento de componentes bajo el conocimiento de normas de seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> • Fomento y competitividad de la planta del aerogenerador • Satisfacción en el trabajo de operación y mantenimiento eólico con la manipulación de herramientas y materiales • Reducción en los costos de mantenimiento de los componentes eólicos • Incremento en la capacidad de solventar fallas en los equipos eólicos

Nota. Se destaca algunos de los beneficios del mantenimiento productivo total en función a la organización, seguridad y productividad. Recuperado de (López, 2016).

Por lo tanto, el Mantenimiento Productivo Total (TPM) y la Industria 4.0 se encuentran estrechamente relacionados en el sentido de que la principal contribución del TPM, es la capacitación de la persona encargada de la operación, quien interviene en el equipo al producirse fallas y mantener el componente en óptimas condiciones de funcionamiento permitiendo de tal manera al usuario mejorar el grado de actitud positiva para detectar problemas potenciales que pueden dañar al equipo (López, 2016). Mientras que con la Industria 4.0 la realidad virtual es una tecnología que permite a las empresas el entrenamiento y formación de sus operarios eliminando costos de capacitación de personal técnico y reduce tiempos de paradas de la máquina (Innoarea Projects, 2021).

Sustentación de Mantenimiento

Estudios que revelan la importancia del mantenimiento en la industria 4.0 como los realizados por (Miranda, 2018) establecen que las acciones de mantenimiento tienen el objetivo de minimizar el impacto visual y económico del producto, así como también desarrollar un nuevo modelo con metodologías que consideren los impactos del mantenimiento que permitan la transición hacia la sostenibilidad donde la industria 4.0 puede impulsar la fabricación sostenible a través de información en tiempo real sobre las condiciones del proceso y los componentes.

Por lo tanto, el modelo de propuesta del presente trabajo de titulación se sustenta en una estrategia de mantenimiento preventiva, correctiva y de actualización como el que se detalla en la Figura 41.

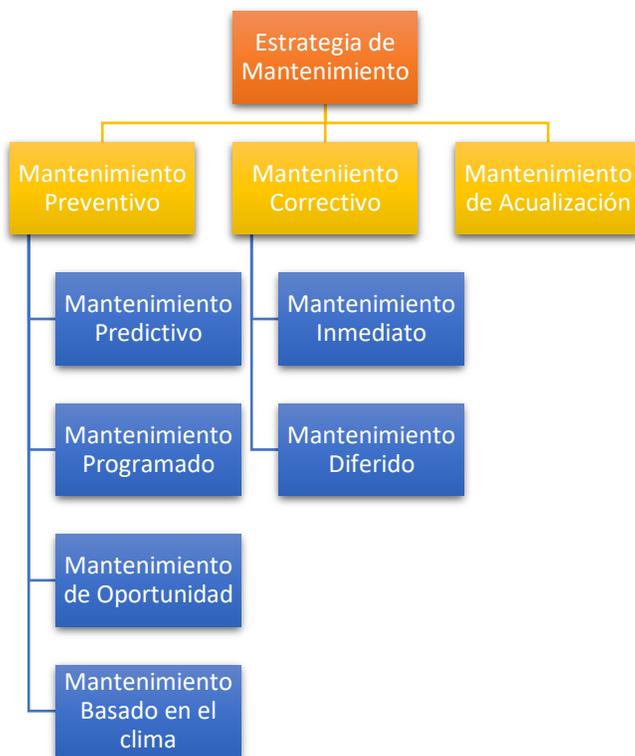
La estrategia sustentada en el mantenimiento preventivo tiene como objetivo asegurar la fiabilidad de los equipos antes de producirse algún fallo o avería, y de esta manera evitar la parada de la máquina (López, 2016). Es considerado en este modelo de propuesta porque el fallo de algún componente durante el mantenimiento puede ocasionar pérdida de vidas humanas, por lo que un

mantenimiento preventivo es muy necesario para evitar fallos y provocar costos inviables. De esta manera entonces se consigue un alto rendimiento y reducción de paradas imprevistas aprovechando la vida útil del equipo.

Detalladamente integra otros mantenimientos para medir el desgaste de los componentes de la turbina con un seguimiento de monitoreo, establece un programa periódico de mantenimiento, aprovecha las paradas de los equipos para revisar las fallas potenciales de los componentes del aerogenerador y nota la influencia de factores meteorológicos como el clima.

Como las fallas en los componentes son imprevistos, el mantenimiento correctivo es importante en el modelo, ya que las acciones correctivas no se pueden planificar, ni calcular un presupuesto requerido. Por lo tanto, es muy importante disponer de una amplia selección de herramientas a disposición de los usuarios para tomar acciones en ese instante, o una vez que surja la falla, se realiza la parada de la máquina para abastecerse de medios y materiales necesarios en la reparación.

Finalmente un mantenimiento de actualización que tiene que ver con el uso de un software en desarrollo conocido como SIMULWIND, que se considera una herramienta de interacción con el entorno virtual en la sala de mantenimiento de un aerogenerador y con los componentes que requieren tareas de mantenimiento mediante el uso de equipos de protección de seguridad personal, manejo de herramientas de trabajo para la manipulación de piezas, y consideración de puntos de tele transporte llamados portales. La serie de pasos secuenciales que componen la lista de prácticas y ejercicios suponen la interacción del usuario con el modelo del aerogenerador 3D en la inspección de los objetos y componentes considerados en el entorno virtual.

Figura 41*Estrategia de Mantenimiento*

Nota. Se describe la estrategia para la creación de tareas y su ejecución en el entrenamiento virtual.

Creación de Tareas de Mantenimiento

Tiene que ver con la creación de las prácticas de la Tabla 9 a desarrollarse en el simulador en base al modelo de propuesta de mantenimiento y aprovechar de entre ellas las tareas que facilitan interactuar con el Software.

Las tareas y las prácticas de mantenimiento se basan en las prioritarias acciones en los componentes del aerogenerador como el Sistema de Frenado, Mecanismo de Orientación de Palas, mantenimiento en torre, multiplicadora, generador, rotor y sistema de transmisión mecánica.

Tabla 9

Lista de Prácticas de Mantenimiento en Simulwind

LISTA DE PRACTICAS	EJERCICIOS	TAREAS
Sistema de frenado	Paro de Aerogenerador. Programación Control Yaw. Verificación de eje lento y rotor. Frenado y Lubricación del Eje Rápido	Verificar el par de apriete de los tornillos Comprobar estado de pinzas y pastillas de frenos. Verificar el disco de freno. Lubricación General Verificar el eje de transmisión
Mecanismo de Orientación de Palas	Control Pitch	Verificar motor de accionamiento Revisión de los niveles de engrase Revisión de posibles fugas de aceite Revisión de rodamientos, piñones y engranajes Revisión de la tornillería en general En el sistema hidráulico, revisión de niveles, fugas y cambio de filtro cuando proceda
Mantenimiento en Torre	Inspección de Puerta. Inspección en parte baja de la Torre. Inspección en parte media de la Torre. Góndola, carcasa, corona	Verificación de la góndola a la torre Aspecto exterior (pintura protectora) Anclaje a la base
Multiplicadora	Inspección de Multiplicadora	Revisión de aceite en la superficie Revisión de acoplamientos Revisión de la tornillería de fijación

LISTA DE PRACTICAS	EJERCICIOS	TAREAS
Generador	Verificar el aspecto general del exterior del generador Verificación de anclajes	Verificar el aspecto general del exterior del generador Verificar el anclaje del generador
Rotor (Buje y Palas)	Inspección visual del conjunto. Detección de fisuras y roturas en el buje y palas. Inspección del estado superficial de las palas. Inspección del sistema de regulación de las palas. Estado del apriete de tornillos en el sistema de regulación de palas.	Inspeccionar visualmente el conjunto rotor Observar si existen roturas y fisuras en el conjunto rotor. Revisar sensorialmente el eje principal. Observar el estado superficial de las palas. Inspeccionar el elemento mecánico del sistema de regulación de palas. Inspeccionar el estado de apriete del elemento mecánico del sistema de regulación de palas
Transmisión Mecánica	Situación y Lubricación del eje lento. Situación y lubricación de anclajes y acoplamientos	Situación de los rodamientos Situación de los acoplamientos Situación de anclajes Lubricación

Nota. Se detalla la lista de prácticas a crearse en el software de simulación virtual con los ejercicios considerados de inspección y mantenimiento de acuerdo al modelo de propuesta en los principales componentes del aerogenerador. Recuperado de (Roldán, 2013).

Instalación de Material

Consiste en tres pasos:

Paso 1: Dirigirse a la página de: www.simulwind.com

Paso 2: Aceptar los términos de uso y licencia

Paso 3: Ingresar el correo electrónico en el apartado para solicitar el enlace de descarga para el simulador Simulwind

Una vez realizado los 3 pasos descritos anteriormente, cada usuario puede configurar la aplicación para el caso respectivo con el acceso al software y el enlace compartido en el anexo B de Tutorial de Descarga, Instalación y Familiarización de Simulwind.

Posterior a ello, se abre el ejecutable de Simulwind.exe versión 1.38 y se ingresa con el usuario: admin@simulwind.com y la contraseña: admin.

Los archivos que aparecen por defecto una vez instalado el material aparecen en la Figura 42 con las carpetas y subcarpetas que poseen los datos necesarios para que el simulador se pueda ejecutar sin ningún inconveniente ni contratiempo.

Figura 42

Archivos dentro de la carpeta de Simulwind descargada

equipo > Windows (C:) > ChristiaNdrés16 > MAESTRIA > TESIS > SimulWind > SimulWind1.38 > Simulwind_1.38

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Photo Print			
MonoBleedingEdge	4/12/2019 11:59	Carpeta de archivos	
Simulwind_Data	4/12/2019 12:00	Carpeta de archivos	
actions.json	23/05/2019 13:08	Archivo JSON	14 KB
binding_holographic_hmd.json	29/04/2019 10:23	Archivo JSON	1 KB
binding_rift.json	29/04/2019 10:23	Archivo JSON	1 KB
binding_vive.json	29/11/2019 14:21	Archivo JSON	1 KB
binding_vive_pro.json	29/04/2019 10:23	Archivo JSON	1 KB
binding_vive_tracker_camera.json	29/11/2019 14:21	Archivo JSON	18 KB
bindings_holographic_controller.json	29/11/2019 14:21	Archivo JSON	12 KB
bindings_knuckles.json	29/11/2019 14:21	Archivo JSON	15 KB
bindings_knuckles_ev1.json	29/04/2019 10:23	Archivo JSON	7 KB
bindings_oculus_touch.json	29/11/2019 14:21	Archivo JSON	13 KB
bindings_vive_controller.json	29/11/2019 14:21	Archivo JSON	18 KB
bindings_vive_tracker.json	29/04/2019 10:23	Archivo JSON	18 KB
Simulwind.exe	29/11/2019 14:21	Aplicación	636 KB
unins000.dat	1/12/2019 17:42	Archivo DAT	1,072 KB
unins000.exe	1/12/2019 17:36	Aplicación	2,499 KB
UnityCrashHandler64.exe	27/02/2019 19:31	Aplicación	1,424 KB
UnityPlayer.dll	27/02/2019 19:31	Extensión de la ap...	22,349 KB
WinPixEventRuntime.dll	27/02/2019 19:25	Extensión de la ap...	42 KB

Nota. Se observan los archivos que permiten evidenciar el funcionamiento del software conjuntamente con su ejecutable.

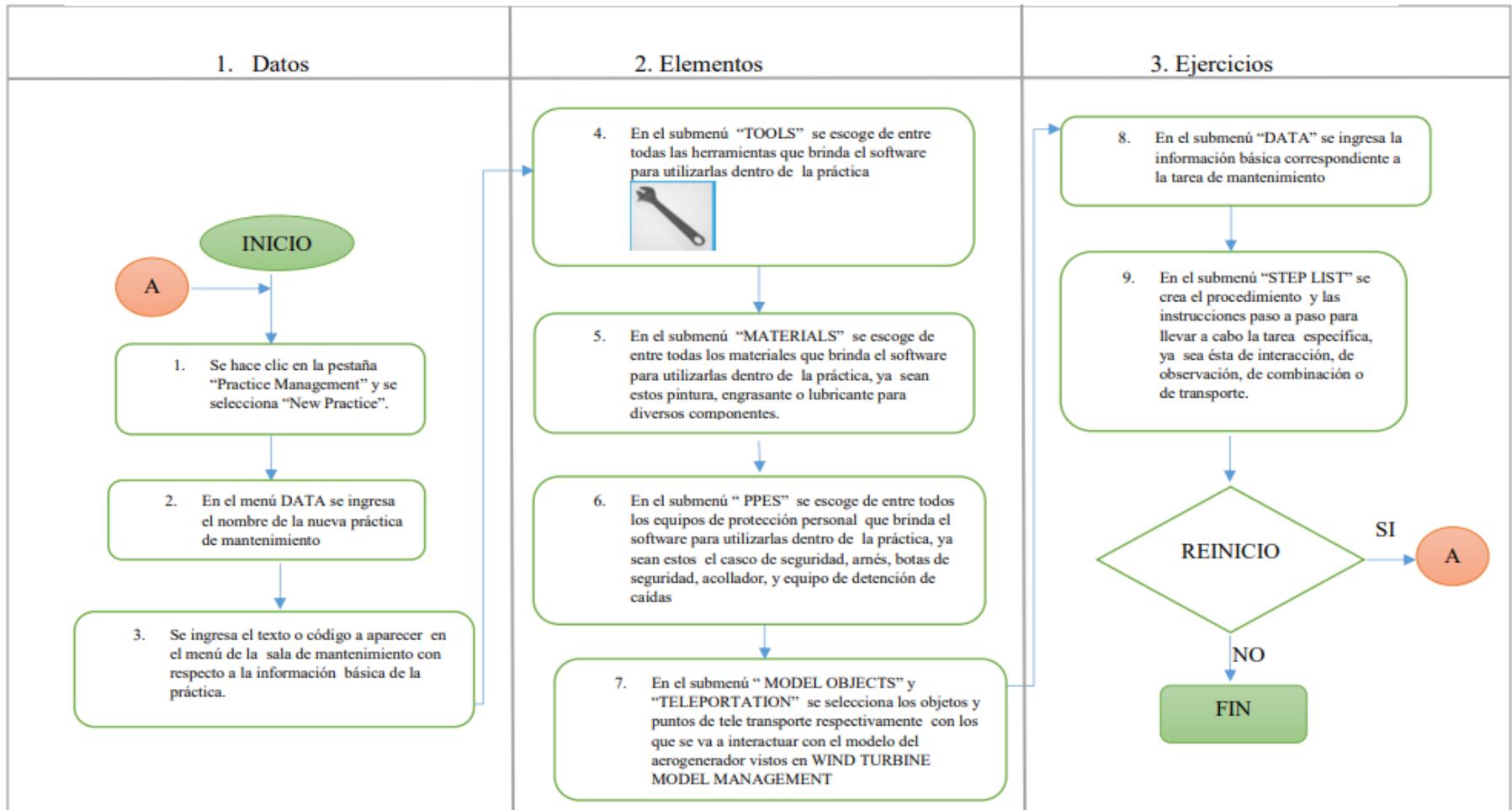
A continuación, se describe por medio de un flujograma como el de la Figura 43, el procedimiento general para la creación de tareas de mantenimiento en los componentes del aerogenerador que se lleva a cabo en el listado de prácticas de la Tabla 9.

Se destacan 3 aspectos importantes que son:

- Datos. - Corresponden a la data que incluye la información básica de la práctica como el nombre e información relevante en el menú de la sala de mantenimiento.
- Elementos. - Corresponden a los elementos con los cuales el usuario de Simulwind va a interactuar. Dichos elementos son las herramientas de trabajo a utilizar como llaves, cinta métrica, torquímetro, brocha, etc. Se disponen de materiales como pintura, engrasante y lubricante. Los equipos de protección personal, como casco de seguridad, arnés, acollador, botas de seguridad, equipo de detención de caídas. Existen puntos de tele transporte que actúan a manera de portal entre diversas zonas del aerogenerador para optimizar tiempos en el transporte de un lugar a otro, y existen también objetos del modelo del aerogenerador con el que el software permite de una u otra forma interactuar.
- Ejercicios.- Corresponden a la data que incluye la información básica sobre la lista de pasos de las tareas de mantenimiento.

Figura 43

Flujograma general para la creación de tareas de mantenimiento en Simulwind



Nota. Se detalla el proceso en la creación de tareas de mantenimiento en Simulwind.

Para la creación de las tareas de mantenimiento en Simulwind, el código utilizado en la estructuración de los contenidos es el lenguaje de Marcado de Hipertexto (HTML). Cabe recalcar que HTML no es un lenguaje de programación, más bien es un lenguaje de marcado que define la estructura de un contenido.

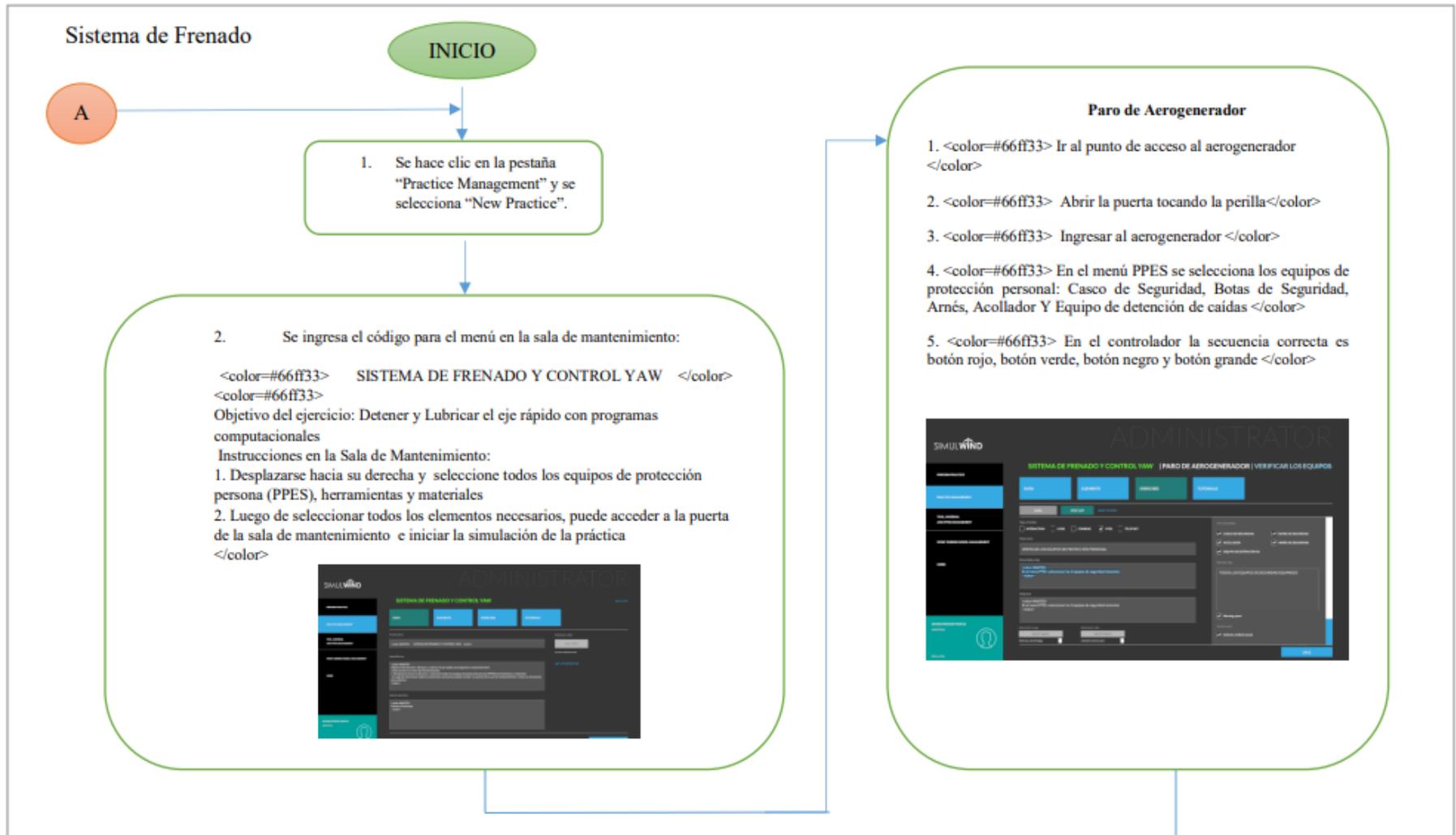
Por lo tanto, HTML consiste en una serie de elementos que se usan para encerrar estructuras del contenido vistas o comportadas de otra forma. El uso de etiquetas de encierre permiten cambiar la palabra a cursiva, agrandar o achicar la letra, etc. Entre las principales consideraciones de programación se ha utilizado códigos de color HTML para una mejor interacción visual con el usuario.

A continuación, se describe por medio de los flujogramas mostrados en las Figuras 44, 45, 46, 47, 48, 49 y 50 la secuencia lógica con los usos de codificación HTML en la creación de las tareas de mantenimiento en: Sistema de Frenado, Mecanismo de orientación de Palas, Mantenimiento en torre, Multiplicadora, Generador, Rotor (buje y palas), Transmisión Mecánica (Ejes, acoplamientos) respectivamente.

El anexo C de Creación de Tareas de Entrenamiento Virtual en el Mantenimiento del Aerogenerador del presente trabajo de titulación indica de forma más detallada el procedimiento realizado en el uso de codificación en cada una de las prácticas, ejercicios y tareas de mantenimiento.

Figura 44

Flujograma en la creación de tareas del Sistema de Frenado



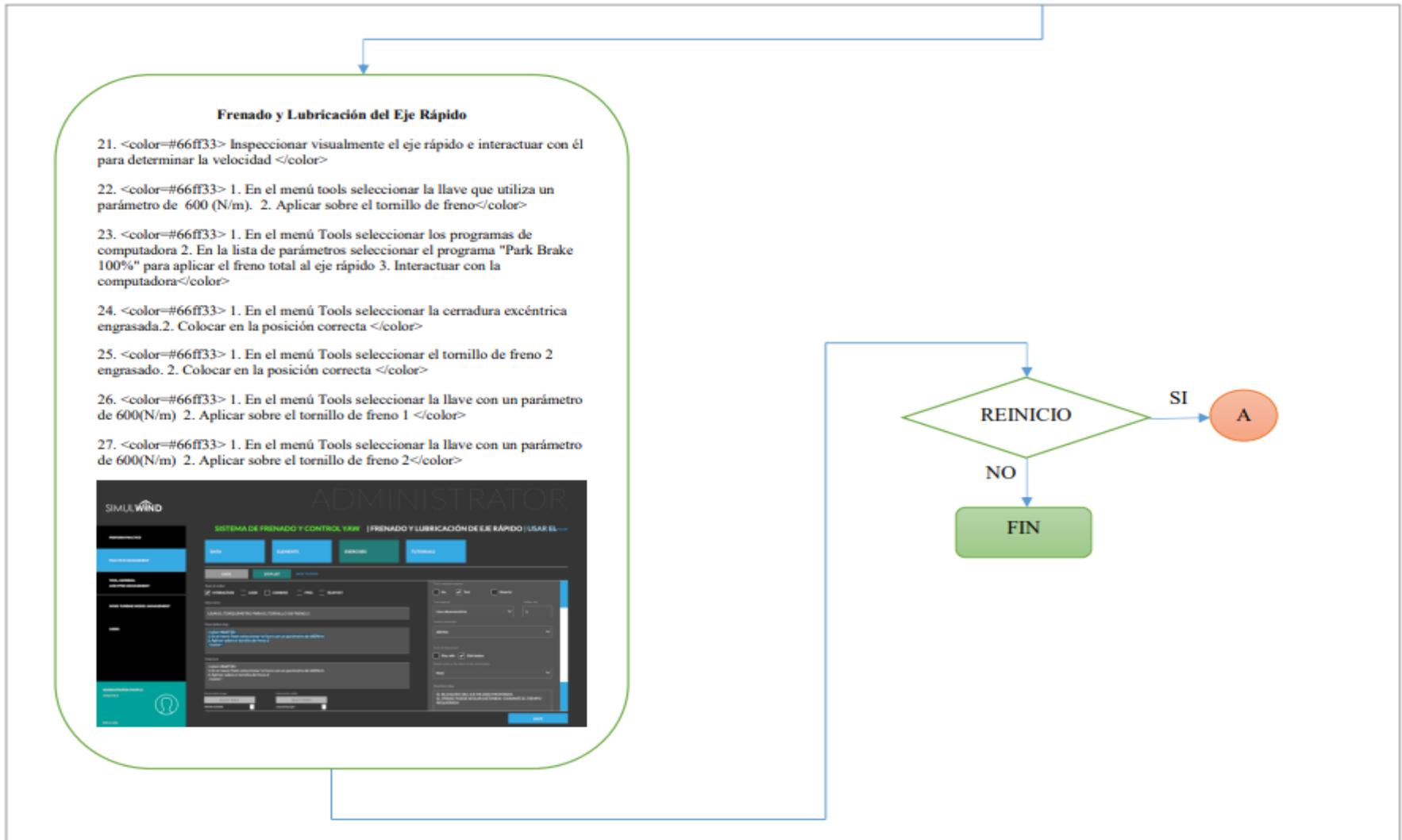
Control Yaw, Eje Lento y Rotor

6. <color=#66ff33> Desplazarse hasta las escaleras para subir a la góndola </color>
7. <color=#66ff33> 1. Combinar computadora con cable RJ45 en el menú TOOLS. 2. Combinado las herramientas conecte la computadora a la alimentación sobre la pared</color>
8. <color=#66ff33> Visualizar e interactuar con el anclaje entre el buje y eje lento </color>
9. <color=#66ff33> 1. En el menú Tools seleccionar los programas de computadora. 2. En la lista de parámetros seleccionar el programa "Carrusel 75%" para reducir la velocidad del rotor 3. Interactuar con la computadora</color>
10. <color=#66ff33> Inspeccionar visualmente que la velocidad del eje lento se reduzca </color>
11. <color=#66ff33> 1. En el menú Tools seleccionar los programas de computadora. 2. En la lista de parámetros seleccionar el programa "Full Park Brake" para reducir por completo la velocidad del rotor 3. Interactuar con la computadora </color>
12. <color=#66ff33> 1. En el menú Tools seleccionar los programas de computadora. 2. En la lista de parámetros seleccionar el programa "90° YAW" para el control de giro circular del aerogenerador. 3. Interactuar con la computadora </color>



Frenado y Lubricación del Eje Rápido

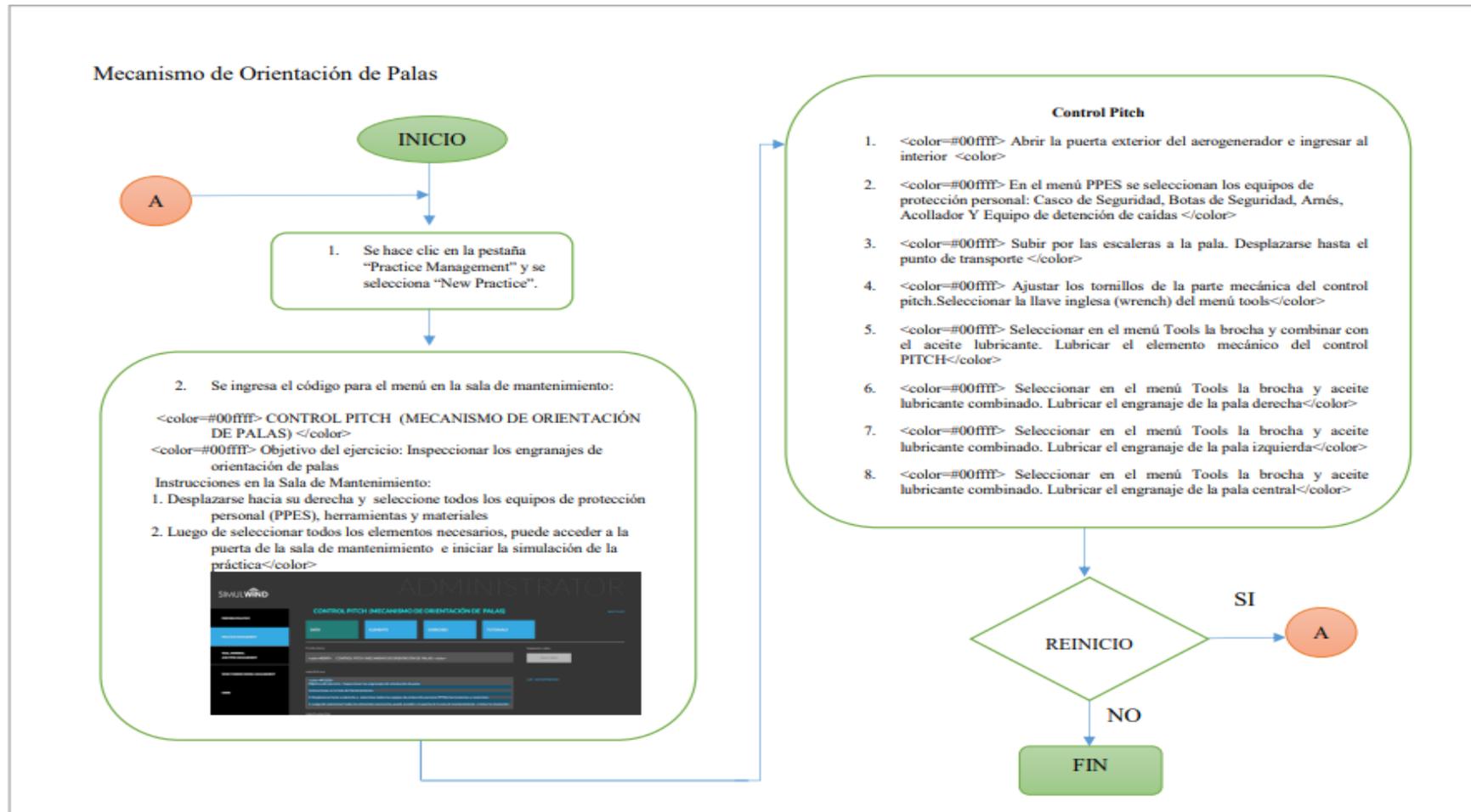
13. <color=#66ff33> 1. Desplazarse e interactuar con el gancho del polipasto que está en la parte superior de la góndola.2. En el menú Tools se escoge el botón de elevación (Hoist Button).3. Mover el polipasto de tal manera que el gancho se asegure con el anillo de la carcasa.</color>
14. <color=#66ff33> 1. En el menú Tools seleccionar la llave inglesa Wrench. 2. Remover los 6 tornillos de la parte superior de la carcasa.</color>
15. <color=#66ff33> 1. En el menú Tools seleccionar el botón de elevación. 2. Mover el gancho del polipasto hacia arriba.3. Retirar la carcasa </color>
16. <color=#66ff33> 1. En el menú Tools se combina el tornillo de bloqueo 1 (Block Screw 1) con el aceite.2. En el menú Tools se combina el tornillo de bloqueo 2 (Block Screw 2) con el aceite.3. En el menú Tools se combina la pastilla de freno (Brake shoe) con el aceite.4. En el menú Tools se combina la cerradura excéntrica (Lock Eccentric) con el aceite.</color>
17. <color=#66ff33> 1. En el menú tools se selecciona el freno engrasado.2. Colocar en la posición correcta </color>
18. <color=#66ff33> 1. En el menú tools se selecciona el tornillo de freno 1 engrasado.2. Colocar en la posición correcta </color>
19. <color=#66ff33> Inspeccionar visualmente el eje rápido e interactuar con él para determinar velocidad de giro </color>
20. <color=#00ffff> 1. En el menú Tools seleccionar los programas de computadora2. En la lista de parámetros seleccionar el programa "Park Brake 0%" para aplicar el freno al eje rápido y se reduzca la velocidad3. Interactuar con la computadora</color>



Nota. Se detalla el proceso en la creación de tareas de mantenimiento con código HTML en Simulwind del Sistema de Frenado.

Figura 45

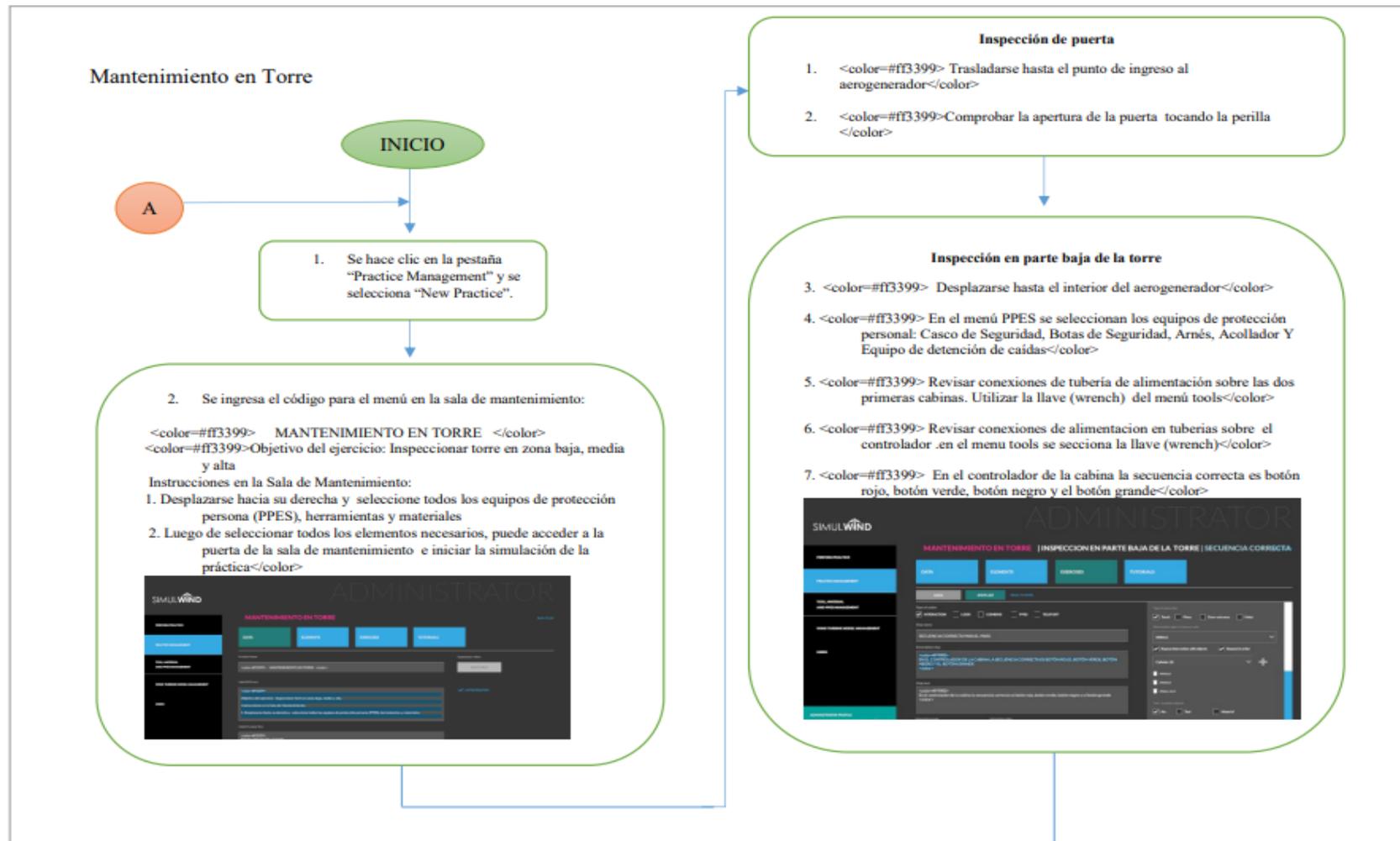
Flujograma en la creación de tareas del Mecanismo de Orientación de Palas

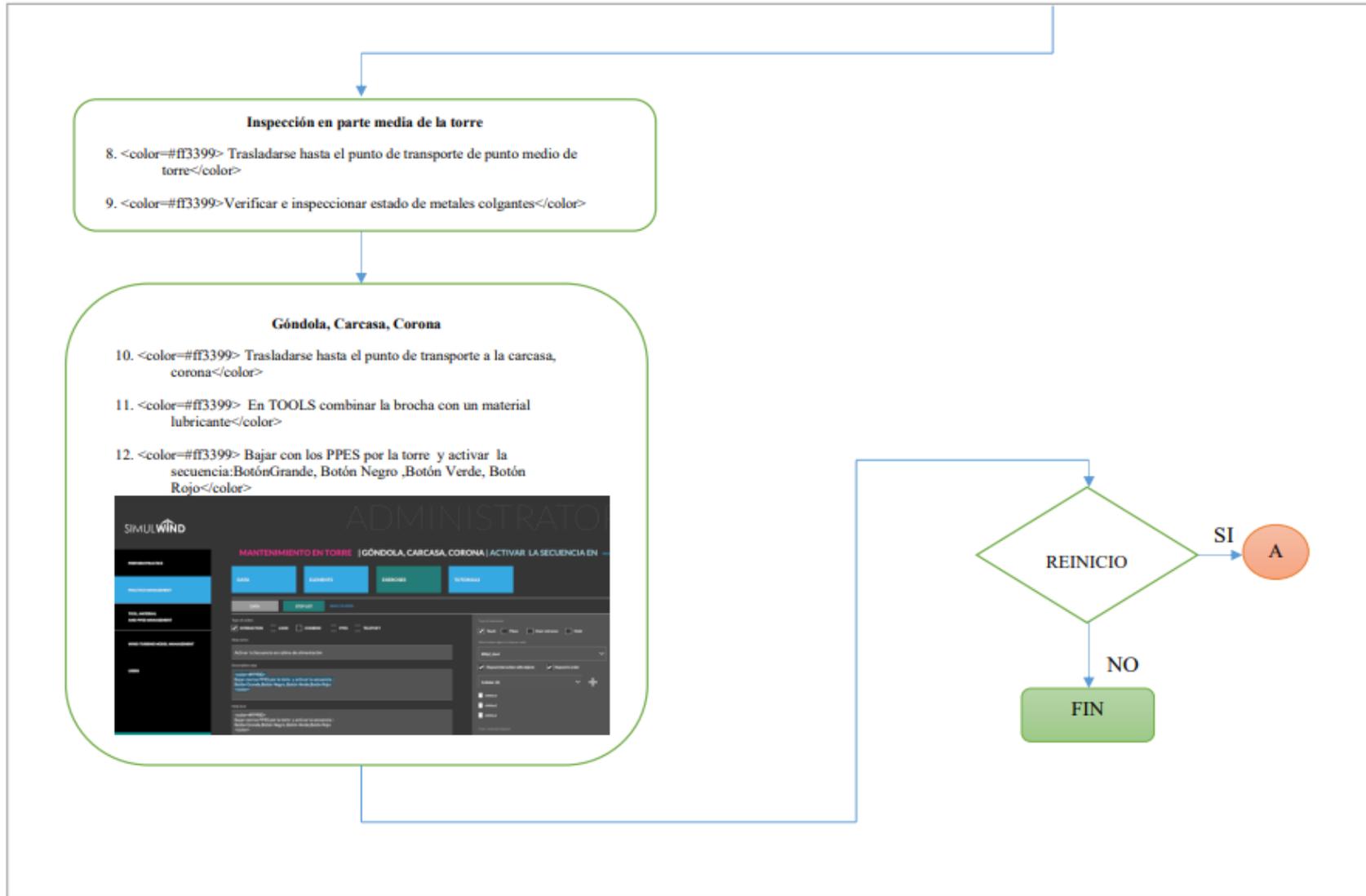


Nota. Se detalla el proceso en la creación de tareas de mantenimiento con código HTML del Mecanismo de orientación de Palas.

Figura 46

Flujograma en la creación de tareas del Mantenimiento en Torre

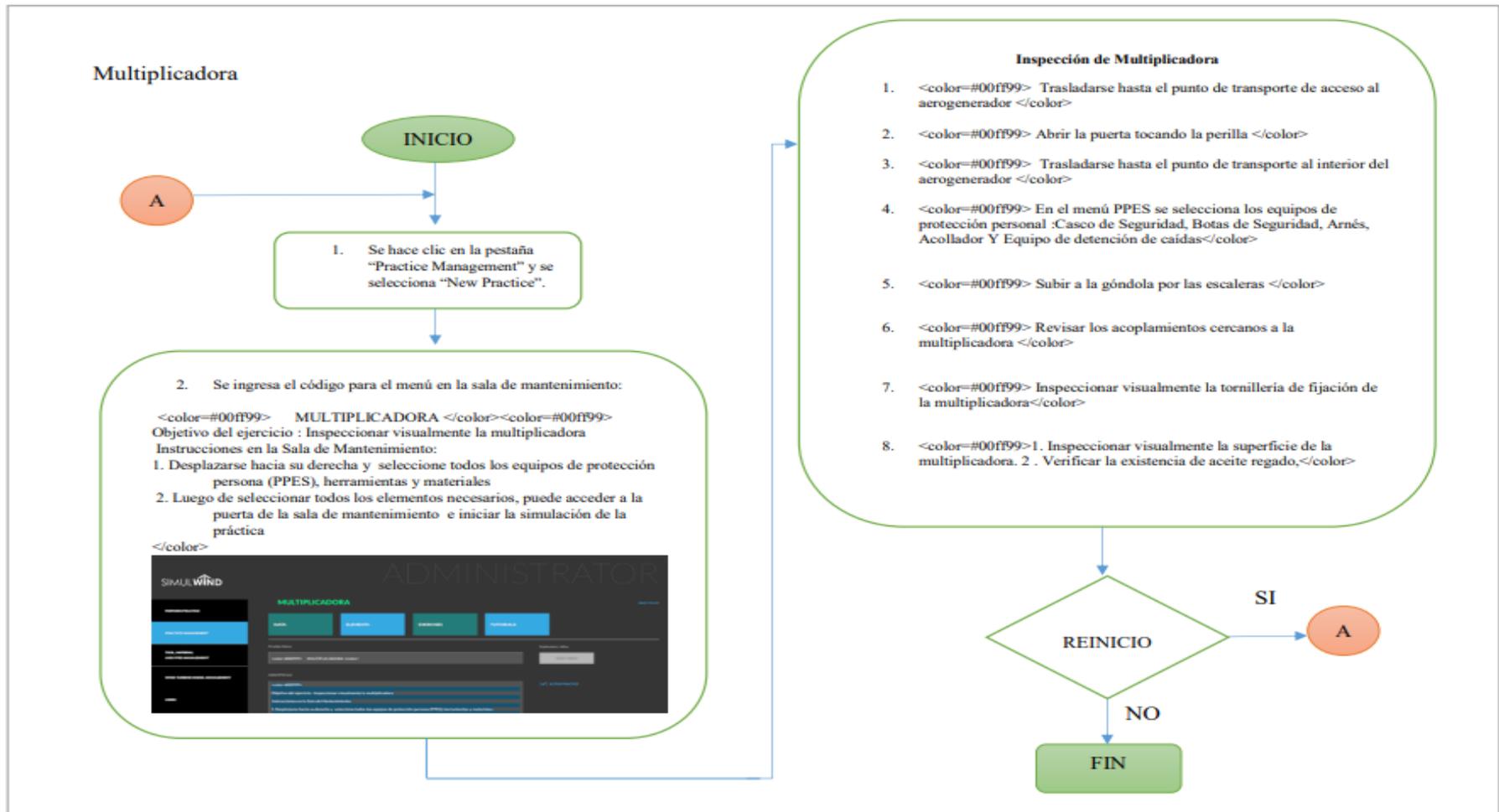




Nota. Se detalla el proceso en la creación de tareas de mantenimiento con código HTML en Simulwind del Mantenimiento en Torre.

Figura 47

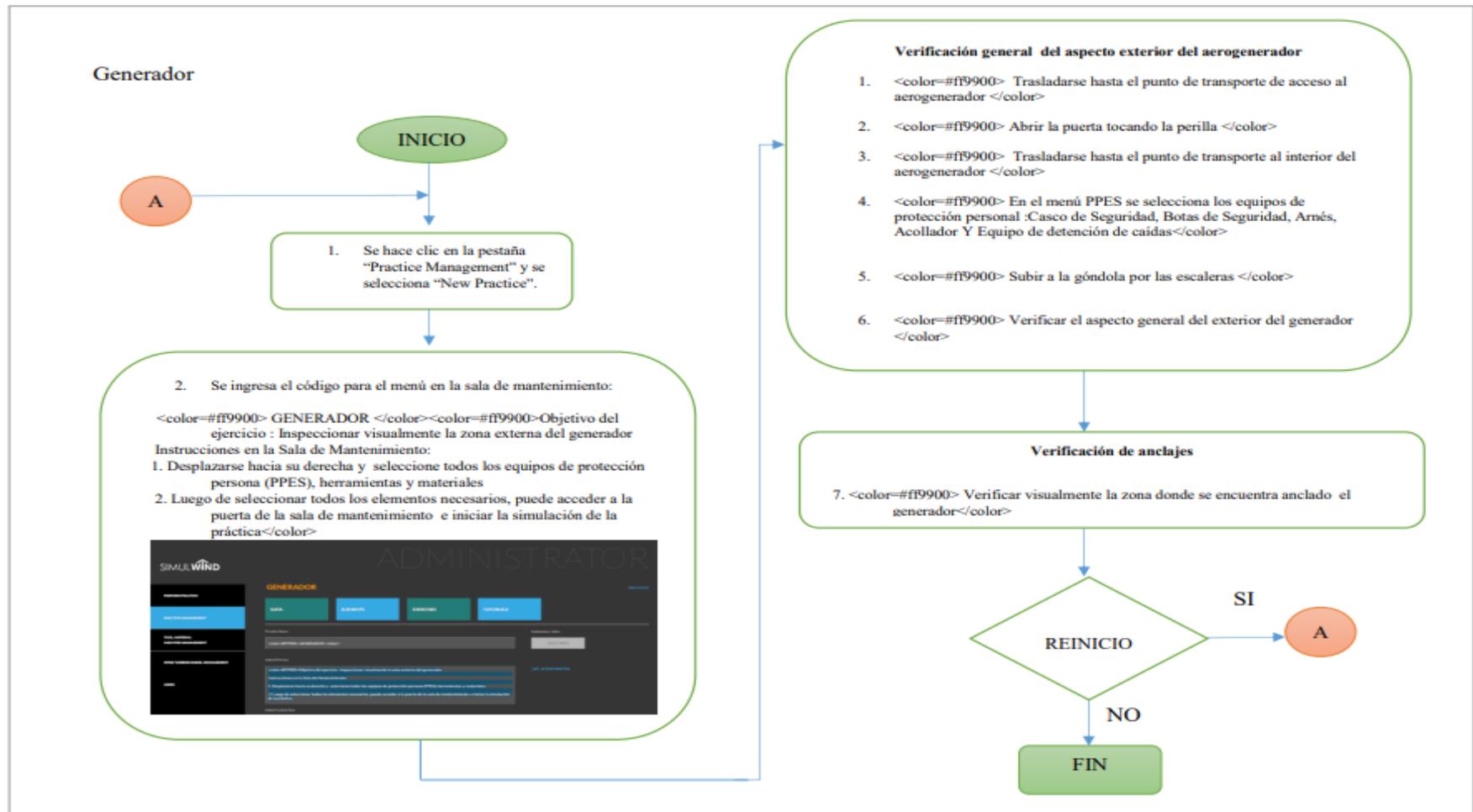
Flujograma en la creación de tareas en la Multiplicadora



Nota. Se detalla el proceso en la creación de tareas de mantenimiento con código HTML en Simulwind de la Multiplicadora.

Figura 48

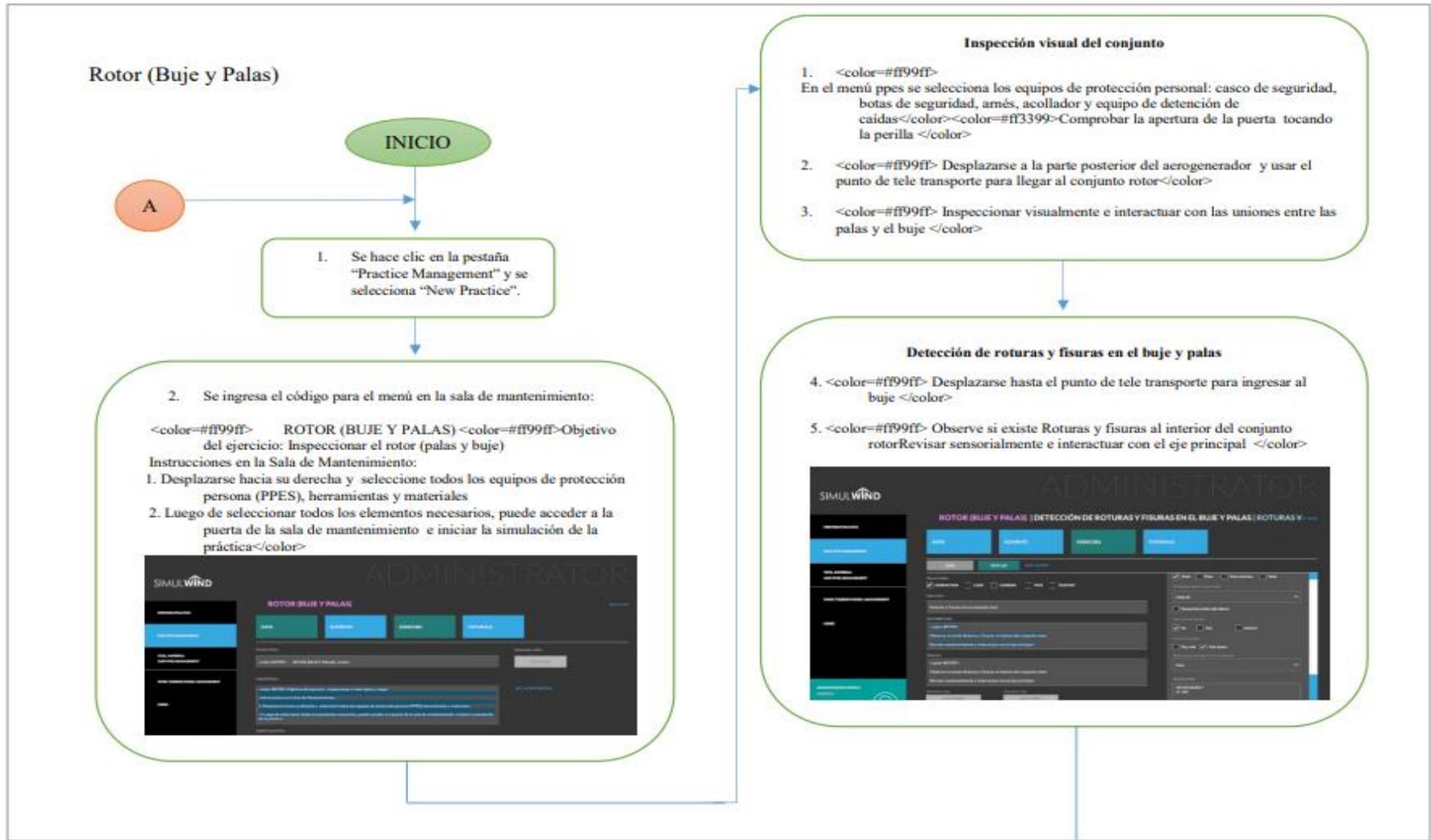
Flujograma en la creación de tareas en el Generador

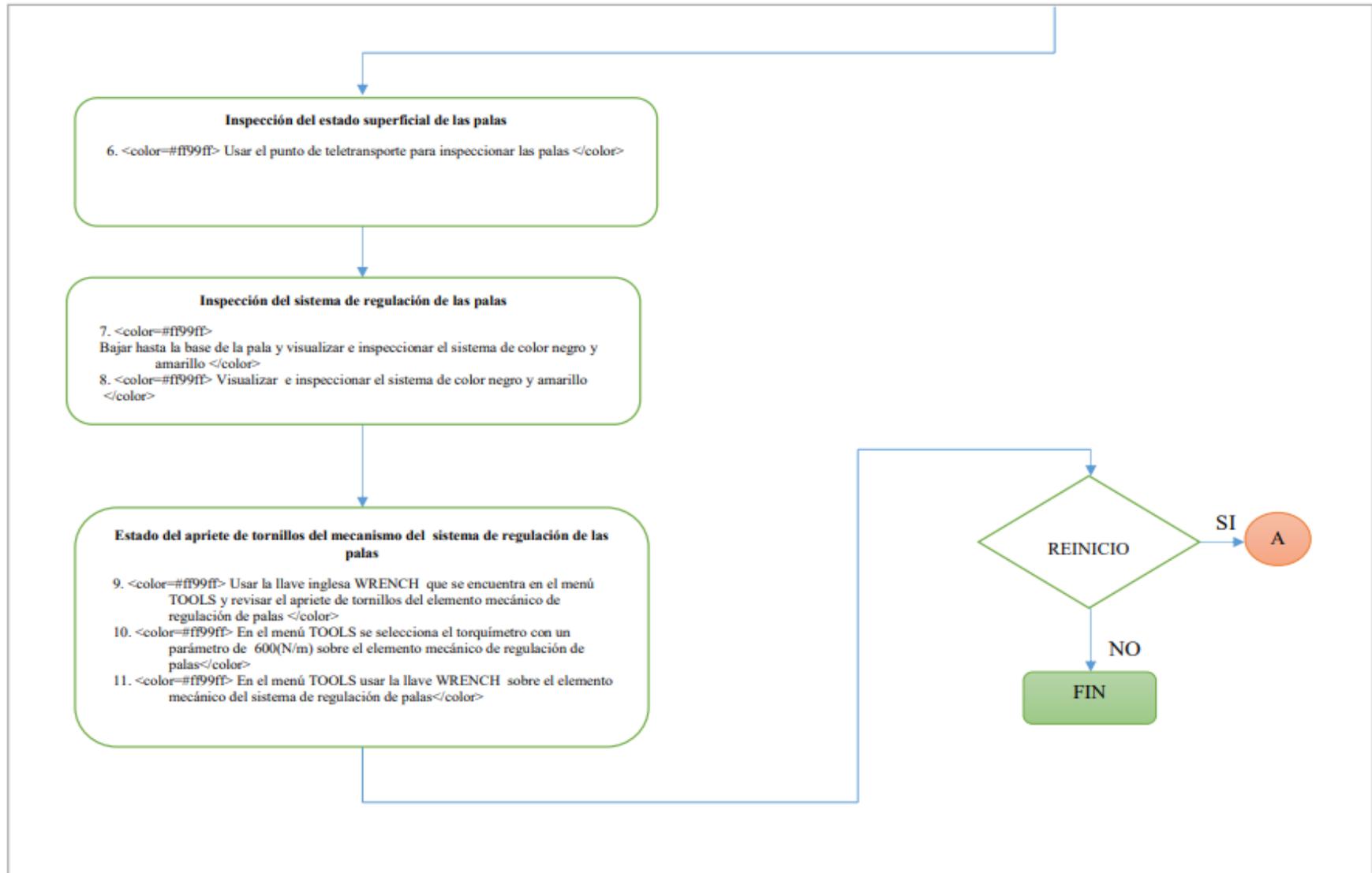


Nota. Se detalla el proceso en la creación de tareas de mantenimiento con código HTML en Simulwind del Generador.

Figura 49

Flujograma en la creación de tareas en el Rotor (Buje y Palas)

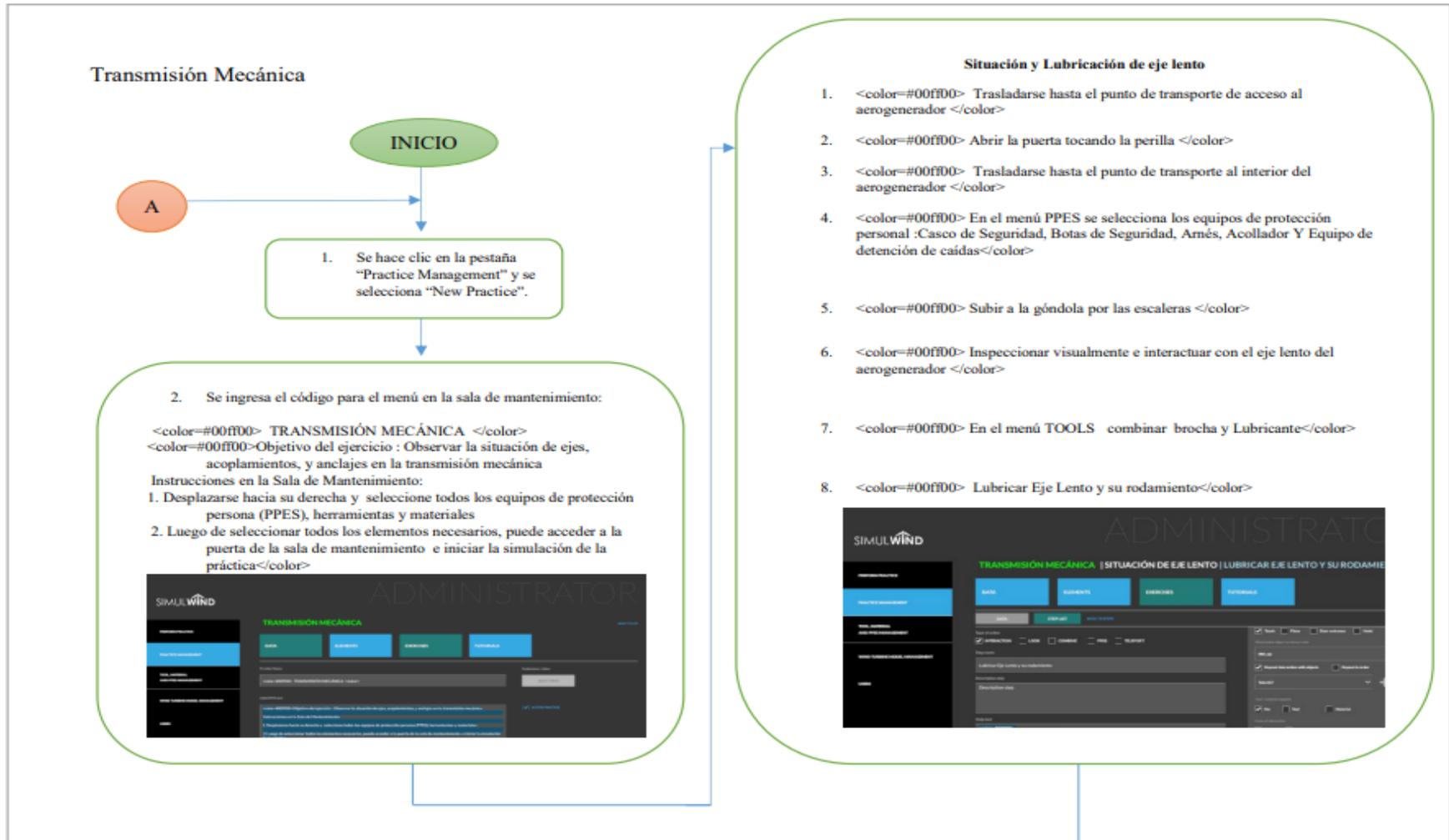


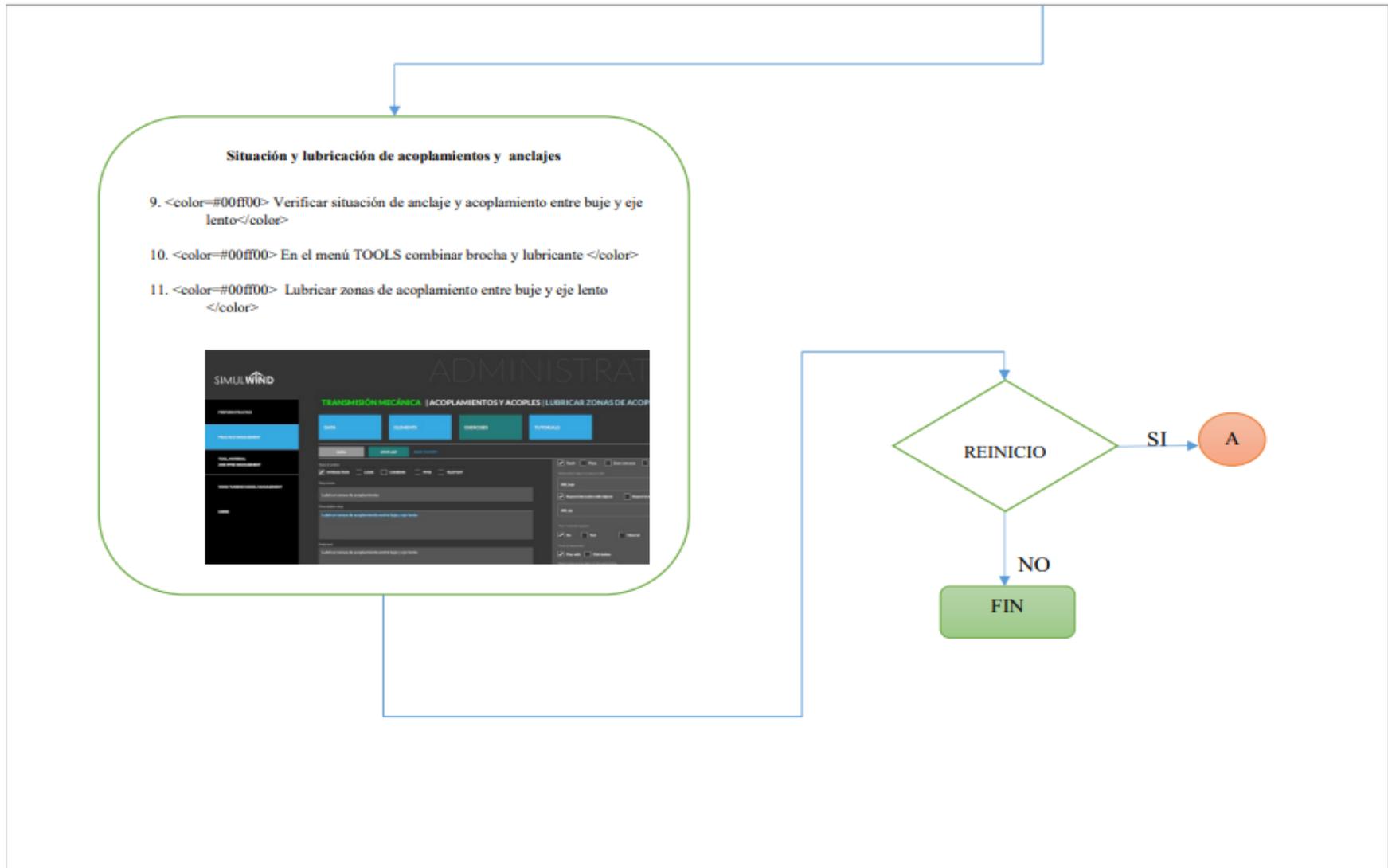


Nota. Se detalla el proceso en la creación de tareas de mantenimiento con código HTML en Simulwind del Rotor.

Figura 50

Flujograma en la creación de tareas en la Transmisión Mecánica





Nota. Se detalla el proceso en la creación de tareas de mantenimiento con código HTML en Simulwind de la Transmisión Mecánica.

Implementación y Pruebas de Entrenamiento Virtual

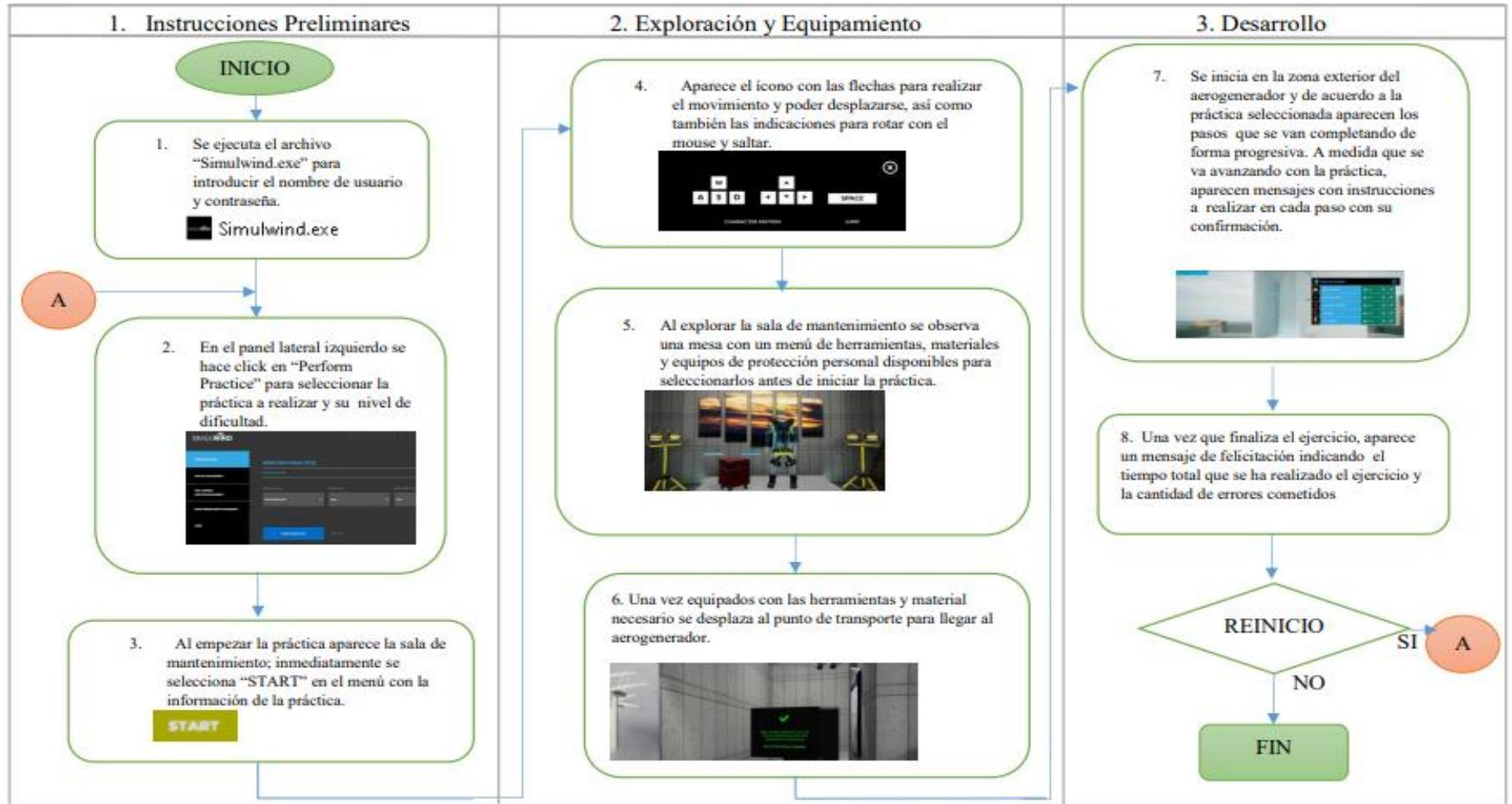
Se realiza la implementación de las prácticas de mantenimiento del aerogenerador en los principales componentes con el procedimiento, acciones y pasos implementados de cada una de las tareas consideradas de la Tabla 9.

A continuación se describe por medio de un flujograma general en la Figura 51, el procedimiento para la implementación del entrenamiento virtual de las tareas de mantenimiento en los componentes del aerogenerador, y en las Figuras 52, 53, 54, 55, 56, 57 y 58 se muestra la secuencia lógica para la implementación del entrenamiento virtual de las tareas de mantenimiento en: Sistema de Frenado, Mecanismo de orientación de Palas, Mantenimiento en torre, Multiplicadora, Generador, Rotor (bujes y palas), Transmisión Mecánica (Ejes, acoplamientos) respectivamente. El anexo D del presente trabajo de titulación indica de forma detallada el procedimiento con cada uno de los pasos a seguir para la implementación y pruebas del entrenamiento virtual.

Se destacan 3 aspectos importantes que son las Instrucciones Preliminares que tiene que ver con la información para iniciar el simulador en donde el usuario puede seleccionar la práctica a desarrollar y el nivel de dificultad considerada entre baja, media y alta; es decir tiene que ver con el estilo de ayuda en cada una de ellas. La Exploración y Equipamiento que tiene que ver con los comandos para el movimiento en el entorno virtual, y con la interacción en la sala de mantenimiento con los equipos de seguridad personal. Y finalmente el Desarrollo que se basa en la lista de pasos que el usuario debe seguir para completar las acciones de mantenimiento en el aerogenerador.

Figura 51

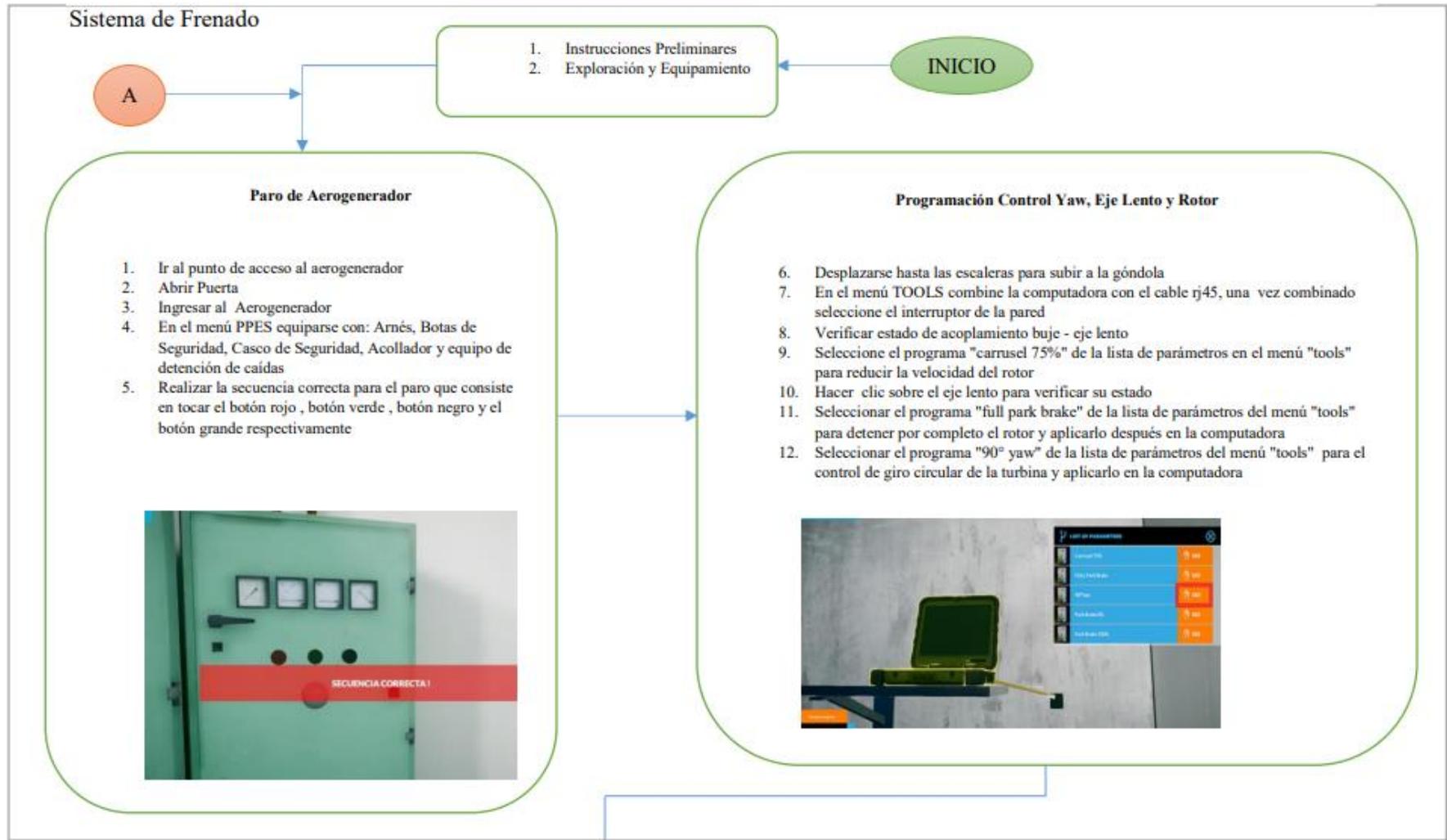
Flujograma general de entrenamiento virtual de las tareas de mantenimiento

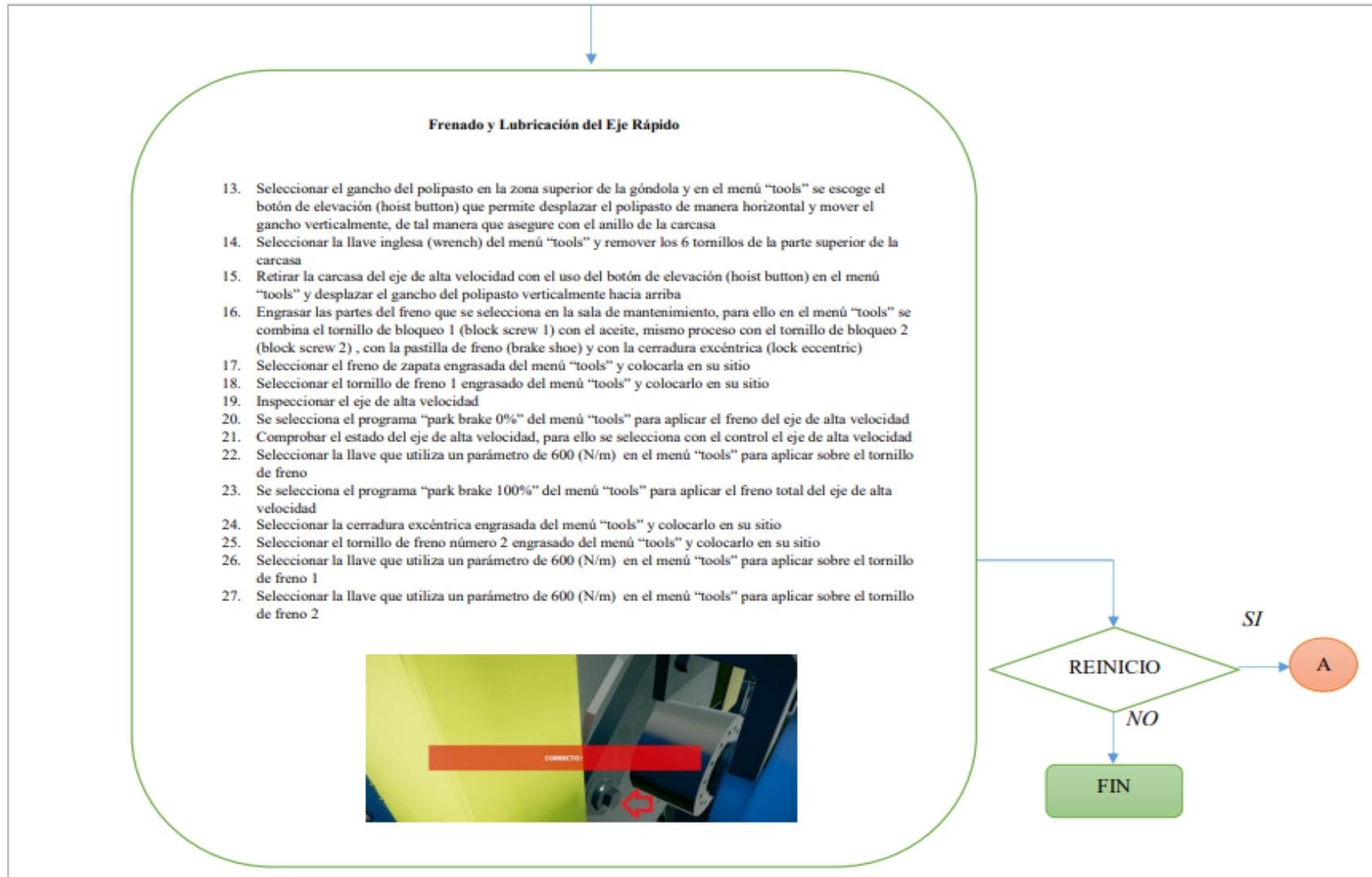


Nota. Se detalla el proceso en la implementación de tareas de mantenimiento en Simulwind.

Figura 52

Flujograma de entrenamiento virtual de las tareas de mantenimiento del Sistema de Frenado

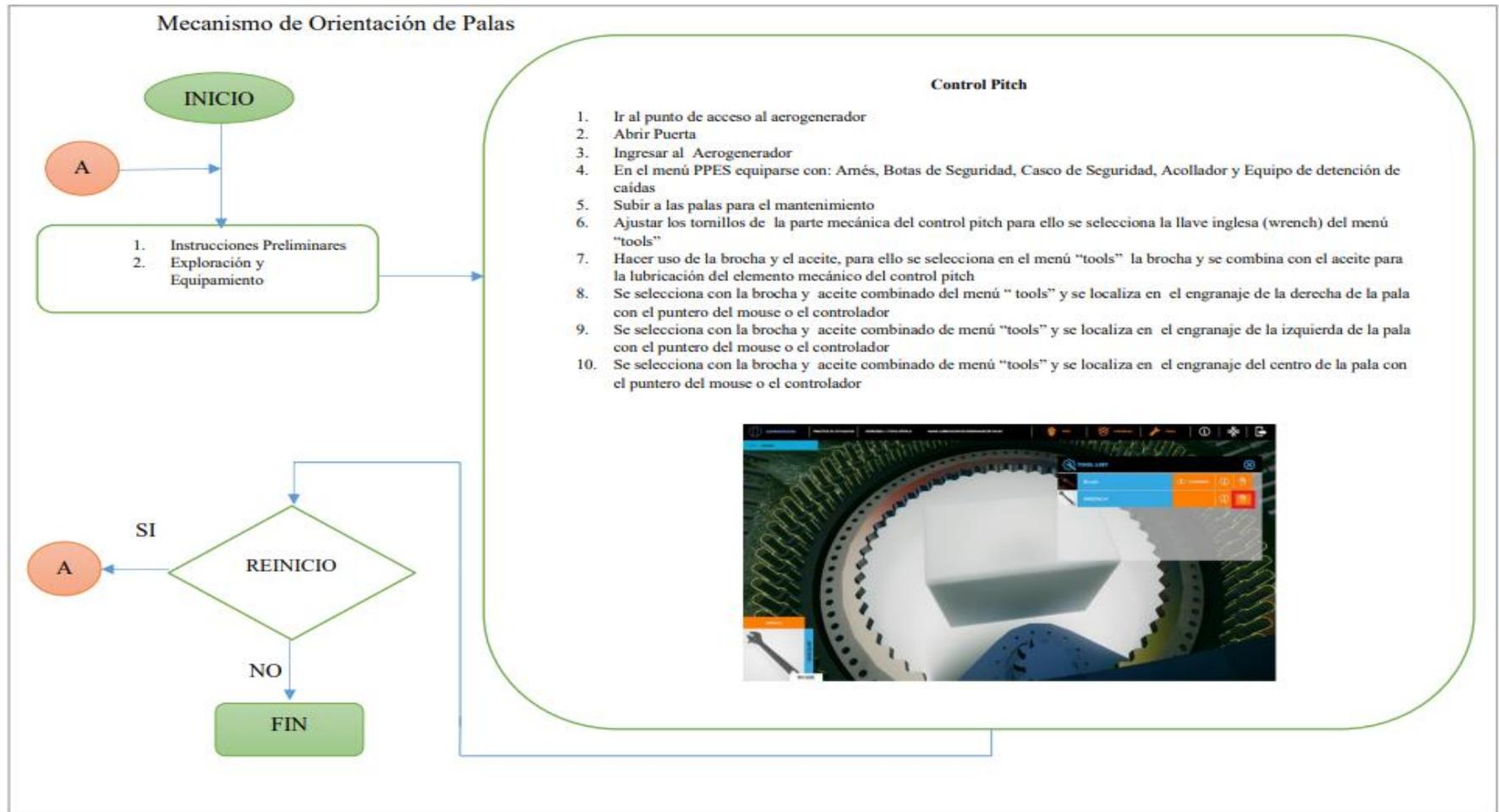




Nota. Se detalla el proceso en la implementación de tareas de mantenimiento en Simulwind del Sistema de Frenado.

Figura 53

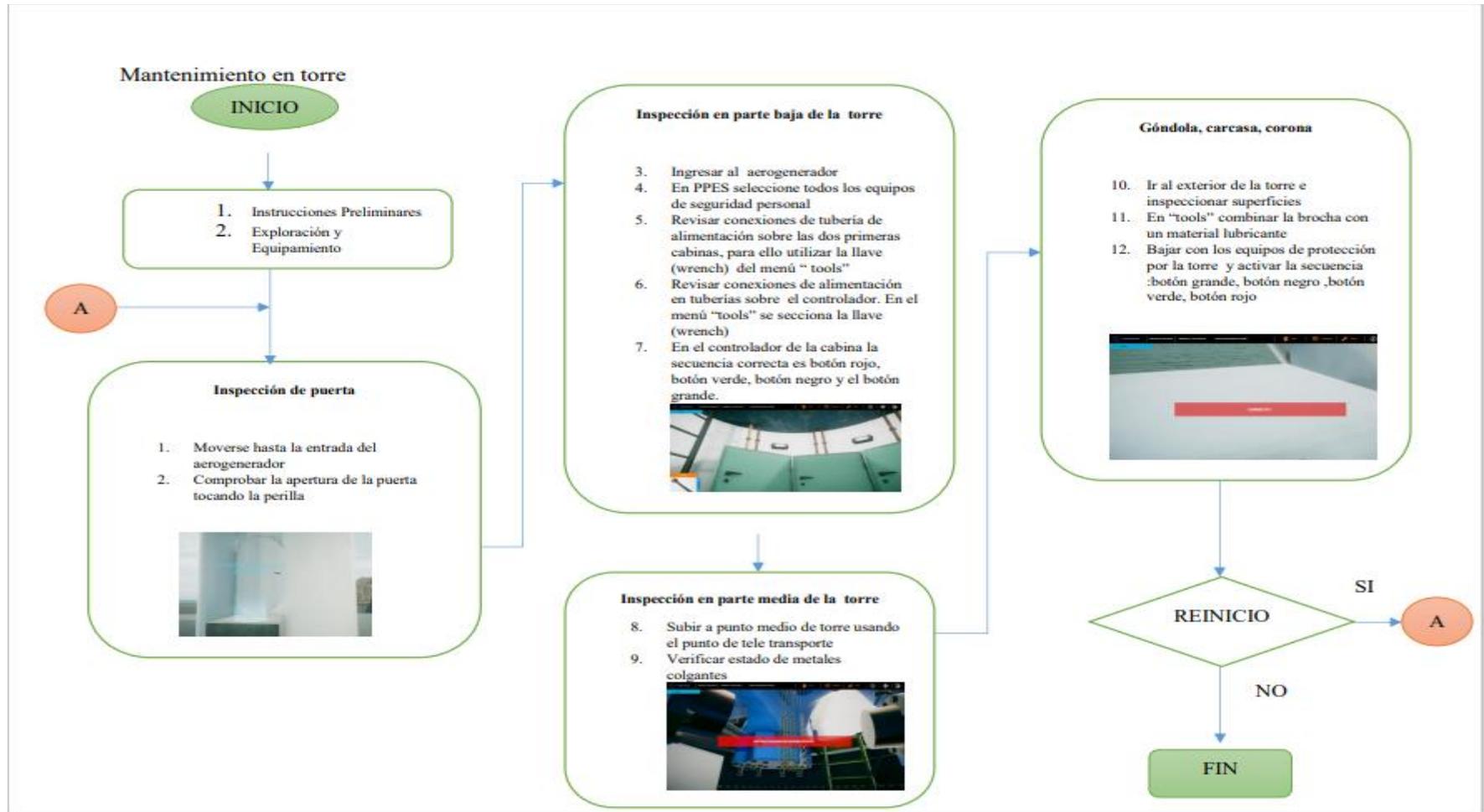
Flujograma de entrenamiento virtual del Mecanismo de Orientación de Palas



Nota. Se detalla el proceso en la implementación de tareas de mantenimiento en Simulwind del Mecanismo de Orientación de Palas.

Figura 54

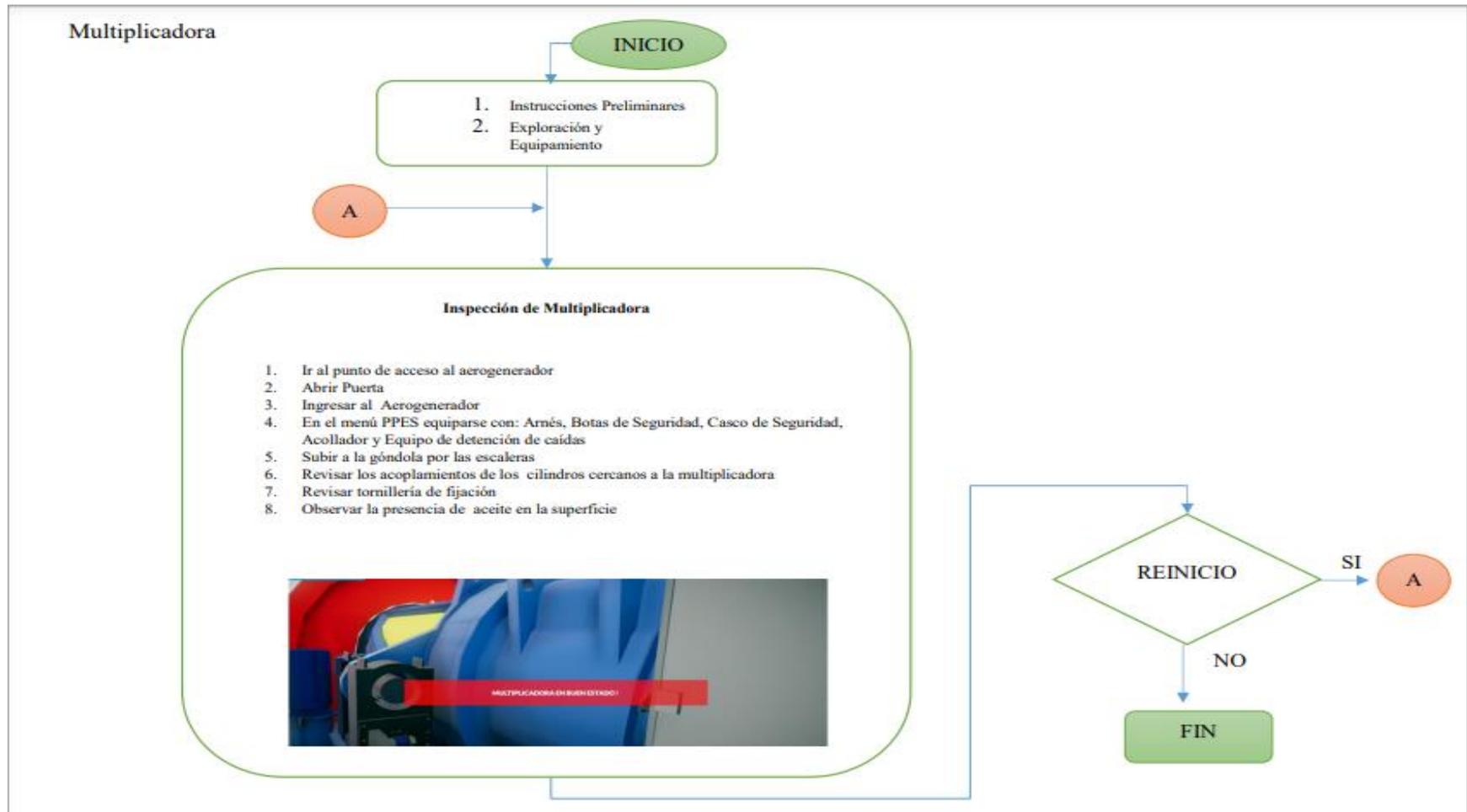
Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en Torre



Nota. Se detalla el proceso en la implementación de tareas de mantenimiento en Torre en Simulwind.

Figura 55

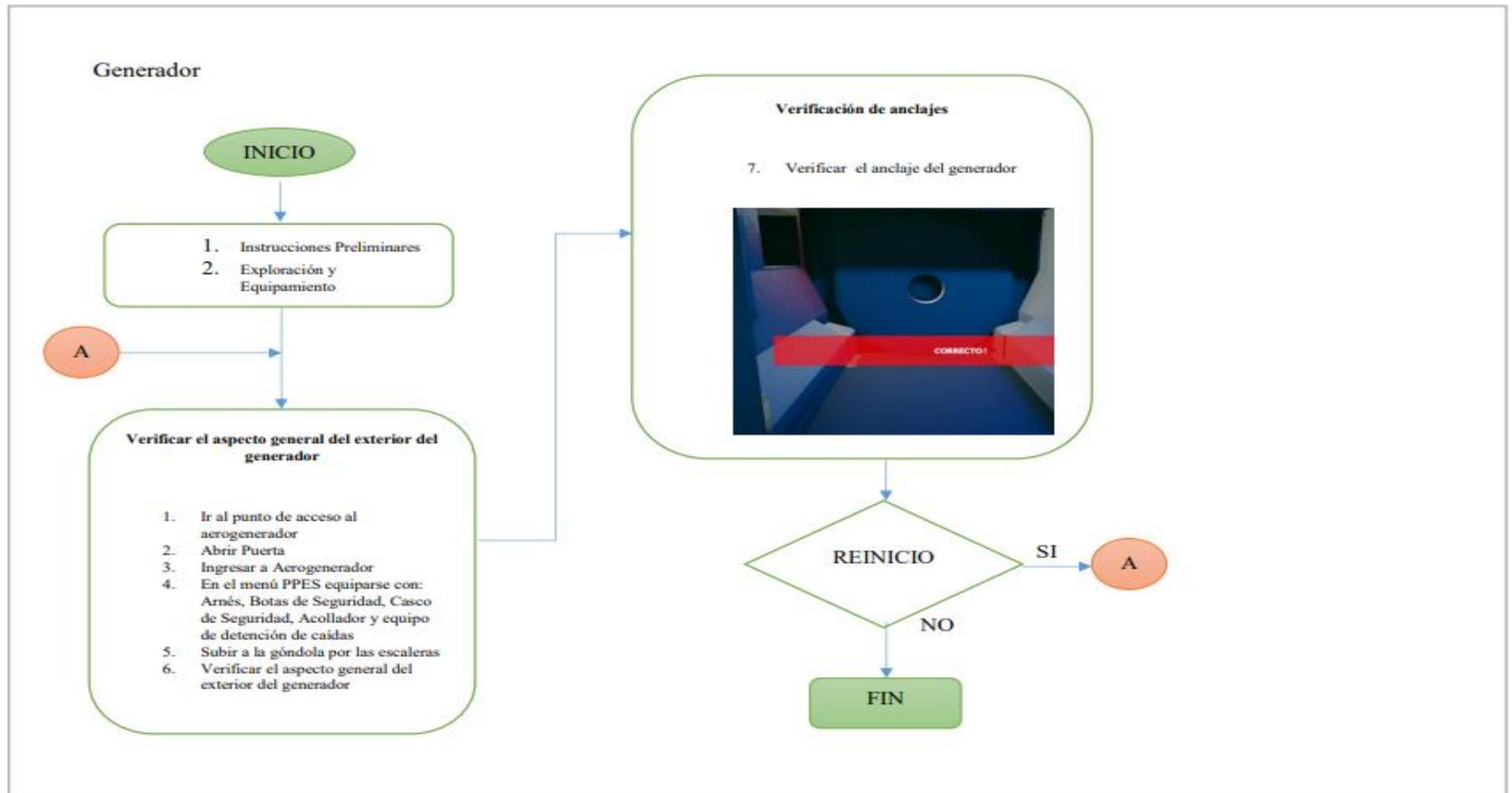
Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en Multiplicadora



Nota. Se detalla el proceso en la implementación de tareas de mantenimiento en Simulwind de la Multiplicadora.

Figura 56

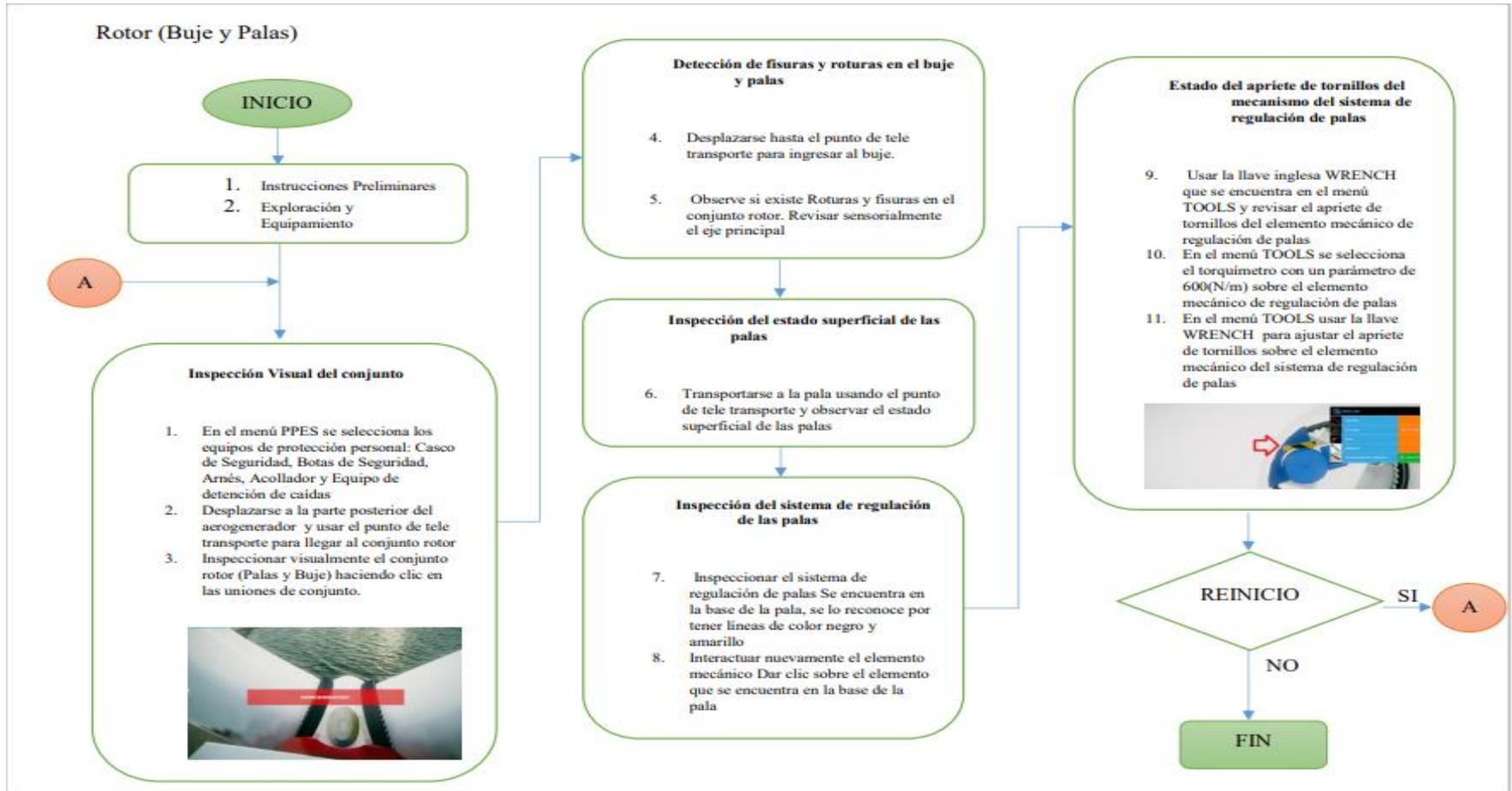
Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en Generador



Nota. Se detalla el proceso en la implementación de tareas de mantenimiento en Simulwind del Generador.

Figura 57

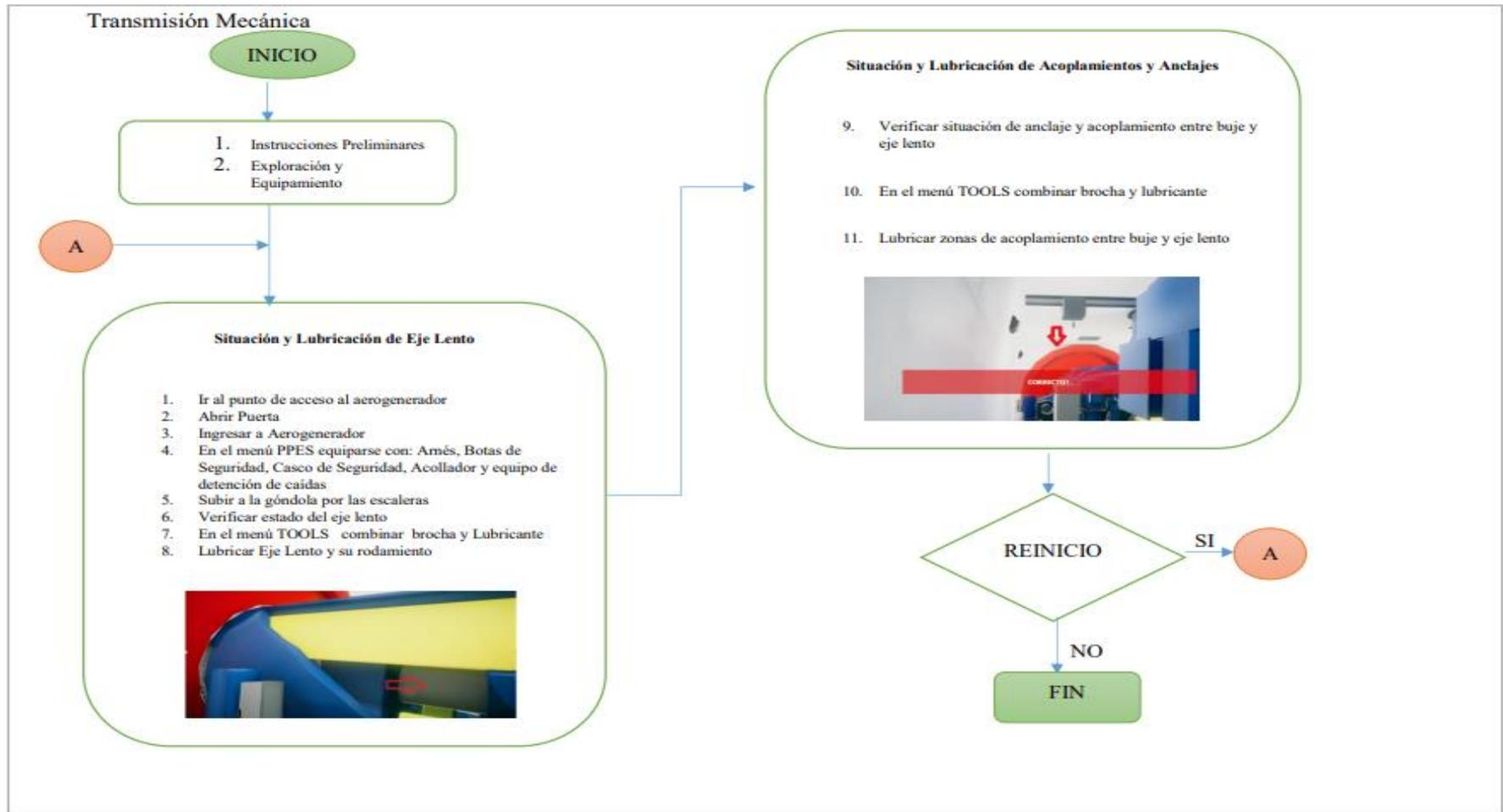
Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en el Rotor



Nota. Se detalla el proceso en la implementación de tareas de mantenimiento en Simulwind del Rotor.

Figura 58

Flujograma de entrenamiento virtual de mantenimiento en la Transmisión Mecánica



Nota. Se detalla el proceso en la implementación de tareas de mantenimiento en Simulwind de la Transmisión Mecánica.

Capítulo IV

Indicadores de Estrategias Tradicionales de Mantenimiento y resultados del Modelo de Propuesta de Mantenimiento Eólico

Los indicadores de la Tabla 2 que se buscan analizar con el modelo de propuesta, son los costos de operación, el desgaste de los componentes del aerogenerador y los tiempos en las tareas de mantenimiento. Mientras que con el entrenamiento virtual se evalúa los niveles de preparación y experiencia frente a situaciones de daños y manejo de herramientas de uso en aerogeneradores que conllevan a la seguridad laboral frente a situaciones de riesgo.

Costos de Operación, Mantenimiento y Administración

De acuerdo al programa de asistencia técnica de la cooperación alemana al desarrollo a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) indican en sus estudios de determinación de costos de operación, mantenimiento y administración fijos de generación con base en energías alternativas (GIZ, 2018) la siguiente información:

Costos de Operación. - Los parques eólicos tienen equipos que requieren supervisión y mantenimiento continuo. En las computadoras se realiza la supervisión de la operación para almacenar datos de relevancia como temperaturas, valores eléctricos, vibraciones y alarmas.

En Sudamérica; en un parque eólico de 30 MW como el de la Tabla 10, se tiene más de 10 aerogeneradores en donde las averías suelen ser más frecuentes. Para las tareas de operación y mantenimiento de un parque eólico el mínimo personal requerido por aerogenerador es de 2 personas, 1 jefe de planta (ingeniero) que es el encargado de coordinar la operación y mantenimiento, 4 técnicos operadores, y 1 técnico administrativo.

La cantidad de personal de un parque eólico de 60 MW se considera el mismo valor de un parque de 30 MW debido al número de aerogeneradores considerados en un rango de 11 a 18 aproximadamente. De manera paralela el caso de un parque de 100 MW se considera el doble de personal, ya que el número de aerogeneradores es de 30 aproximadamente.

Tabla 10

Costos de Personal de Operación para una planta de 30 MW

Ítem	Descripción	Cantidad	Sueldo Mensual (USD)	Costo anual (USD)
1	Jefe de Planta (Ingeniero)	1	2300	37674
2	Operador (Técnico Superior)	4	1200	78624
3	Técnico administrativo	1	800	13104
Total				129402

Nota. Se detallan los costos anuales de personal de operación eólico. Recuperado de (GIZ, 2018).

Costos de Mantenimiento. - Para los parques eólicos se suele realizar un contrato de mantenimiento y garantía de disponibilidad con el fabricante de los aerogeneradores. El servicio de mantenimiento abarca costos de mantenimiento programado, reparaciones, consumibles y repuestos cuyos costos van aumentando con el avance de los años de funcionamiento.

Los costos de mantenimiento de parques eólicos son tomados como costos variables debido a las partes móviles que poseen estas máquinas, y por lo tanto los trabajos de mantenimiento se relacionan con el tiempo e intensidad de uso influyendo directamente con el nivel de producción.

De acuerdo a la información proporcionada por (GIZ, 2018), y por el experto integrado especialista en Operación y Mantenimiento Stephan Schäfer; no existe economía de escala en los costos de mantenimiento externo, debido que el servicio se realiza por aerogenerador, más no por el parque eólico completo.

Se resume en la Tabla 11 información de costos de mantenimiento en parques eólicos de 30 MW, 60 MW y 100 MW.

Tabla 11

Costos de Mantenimiento

Contrato de	Costo anual (USD)
Mantenimiento Externo	
30 MW	565013
60 MW	1130025
100 MW	1883375

Nota. Se detallan los costos anuales de mantenimiento en parques eólicos de 30 MW, 60 MW y 100MW.

Recuperado de (GIZ, 2018).

Costos Administrativos.- Según (Raso, 2015) hacen referencia a los costos de vigilancia, transporte, seguros, mantenimiento de terrenos, caminos, etc.

Se detallan en la Tabla 12 los costos anuales administrativos en parques eólicos de 30 MW, 60 MW y 100 MW.

Tabla 12

Costos Administrativos

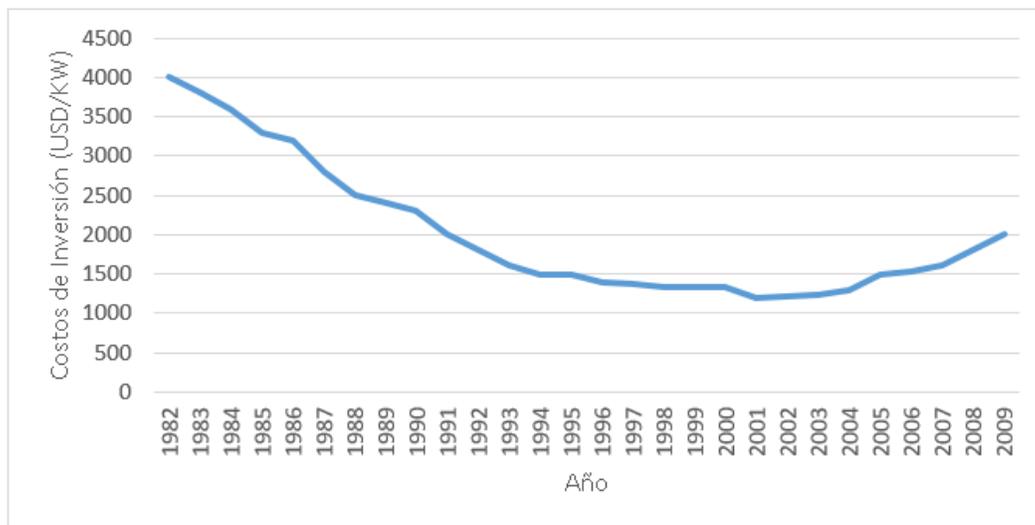
Descripción	Costo anual (USD)		
	30 MW	60 MW	100 MW
Vigilancia	10190	14266	19972
Vehículo	7600	7600	15200
Seguros	210000	350692	477569
Mantenimiento de terrenos	10500	21000	29400
Artículos de oficina	3000	4000	6000
Total	241290	397558	548141

Nota. Se detallan los costos anuales administrativos en parques eólicos de 30 MW, 60 MW y 100MW. Tomado de (GIZ, 2018).

Costos de Inversión. - Asociado directamente a los costos de desarrollar energía eléctrica a través de aerogeneradores. La Figura 59 muestra los costos de inversión históricos en USD/KW en Estados Unidos desde el año 1982 hasta el año 2009, en donde se observa una reducción de aproximadamente del 70% desde los 4000 USD/KW en el año 1982 hasta cerca de los 1200 USD/KW en el año 2001. A partir del año 2001 los costos suben un 60% hasta el año 2009 llegando a los 2000 USD/KW.

Figura 59

Costos de Inversión en Estados Unidos



Nota. Se observan los costos de inversión para plantas eólicas onshore en Estados Unidos hasta el año 2009. Recuperado de (Viñuela, 2012).

Los costos de inversión dependen mucho de la tecnología usada en los aerogeneradores. La Tabla 13 **muestra** los costos de inversión y mantenimiento en tecnología onshore y en tecnología offshore al año 2011.

En tecnología onshore los costos de inversión se encuentran en un intervalo entre los 1125 y 1525 €/kW que suponen costos de operación y mantenimiento entre los 35 y 45 €/kW anuales en una planta eólica con un promedio de vida útil de 25 años.

En tecnología off shore los costos de inversión se encuentran en un intervalo entre los 3350 y 3500 €/kW que suponen costos de operación y mantenimiento de 120 €/kW anuales en una planta eólica con un promedio de vida útil de 25 años.

Tabla 13*Costos de Inversión en Europa al año 2011*

Tecnología	Especificación de la Planta	Costos de Inversión (€/kW)	Costos de Operación y Mantenimiento(€/kW) al año	Promedio de vida útil (años)
Tecnología onshore	Planta eólica	1125-1525	35-45	25
Tecnología offshore	Planta eólica	3350-3500	120	25

Nota. Se observa que los costos de inversión en tecnología onshore son cercanos a la mitad que la tecnología offshore. Recuperado de (Viñuela, 2012).

Los costos de inversión tienen que ver con el costo de la turbina, el costo de la conexión eléctrica, obras civiles y otros costos que requieren inversión como se observa en la Tabla 14 que muestra la distribución de costos de inversión para las diversas tecnologías.

De acuerdo a (Viñuela, 2012) el aumento de demanda y el alto costo de materia prima como acero y cobre producen una evolución en los costos de inversión a partir del año 2001 con cerca los 700 USD/kW a los 1000 USD/kW en el año 2007.

Tabla 14

Distribución de los costos de inversión para tecnologías de plantas eólicas

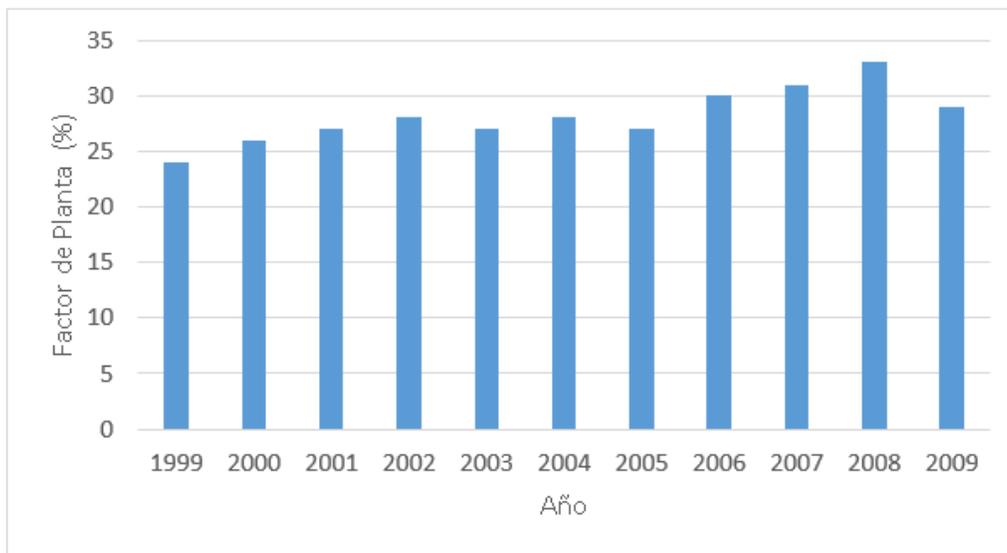
Costo de los componentes	Onshore (%)	Offshore (%)
Turbina	71 - 76	37 - 49
Conexión eléctrica	10 - 12	21 - 23
Obra civil	7 - 9	21 - 25
Otros costos de inversión	5 - 8	9 - 15

Nota. Se observa que los costos más relevantes en tecnología onshore son los de la turbina. Recuperado de (Viñuela, 2012).

Factor de Planta.- Según (Barragán, 2012) es la relación entre la energía producida en un determinado período con respecto a la potencia asignada al aerogenerador en dicho período. Un factor de planta se considera aceptable cuando es superior al 25% y bueno cuando es superior al 30%, señalando que el factor de planta de un aerogenerador en operación está entre el 30 a 40 %. El factor de planta es crucial para determinar la viabilidad de un proyecto ya que indica la cantidad de energía que puede generar una central eólica. En la Figura 60 se observa el factor de planta promedio de Estados Unidos desde el año 1999 hasta el 2009.

Figura 60

Evolución del factor de planta para plantas eólicas en Estados Unidos



Nota. Se observa un factor de planta promedio del 30 % en plantas eólicas de Estados Unidos en el período 1999 - 2009. Recuperado de (Viñuela, 2012).

En base a los costos de las estrategias tradicionales de las Tablas 10, 11 y 12 con referencia a un parque eólico de 30 MW y tomando referencia a (Ubitts, 2019) quienes consideran que con una adecuada capacitación se obtiene un efecto positivo en la retención de empleados, ventas y rentabilidad; el presupuesto de capacitación varía de acuerdo a las necesidades específicas de la empresa y se establece un intervalo estándar entre 2 a 2.5 % del presupuesto de la compañía para la asignación en la capacitación de empleados de la empresa.

En la Tabla 15 se presenta un resumen de costos para el parque de 30 MW de acuerdo a (GIZ, 2018), en la cual se determina que del costo total anual de 935705 USD, se destinan para capacitación 18714.1 USD.

Tabla 15*Costos de Estrategias de Mantenimiento Tradicional*

Descripción	Estrategias Tradicionales	Inversión en Capacitación
	Costo anual (USD)	(USD)
		2 % del Total
Costos de Operación	129402	
Costos de Mantenimiento	565013	
Costos de Administración	241290	
Total	935705	18714.1

Nota. Se detalla los costos de operación, mantenimiento y administrativos de las estrategias tradicionales de mantenimiento que establece un estándar del 2% del total en capacitación.

La estrategia de mantenimiento del modelo de propuesta del trabajo de titulación se basa en el software de soporte de mantenimiento para facilitar la inspección del aerogenerador en el proceso de determinar la condición de la máquina mientras está funcionando.

Gracias al avance tecnológico enfocado en la industria 4.0 con la simulación de entornos virtuales, se interpreta y usa la información que contribuye a las empresas a la anticipación y reducción de fallas para la pronta reparación.

En la Tabla 16 se detallan los costos en la inversión para la capacitación en el entrenamiento virtual con el modelo de propuesta, en el cual se considera el uso de computadores de alta gama, equipos de realidad virtual como gafas y controladores en 12000 USD, sumados con el pago de sueldos de instructores de 4800 USD.

Tabla 16*Costos de Estrategia de Mantenimiento del Modelo de Propuesta*

Descripción	Cantidad	Valor unitario/Sueldo (USD)	Subtotal (USD)	Inversión para la Capacitación en el Entrenamiento Virtual en el primer año (USD)
PC con tarjeta gráfica o tarjeta de video de gama alta o superior	4	2700	10800	10800
Gafas de realidad virtual: Oculus Quest 2	4	300	1200	1200
Personal para capacitación	1	1200	1200	4800
Total				16800

Nota. Se detalla los costos en la inversión para el entrenamiento virtual en el primer año representados en el uso de equipos de realidad virtual sumados con el sueldo de instructores.

Por lo tanto en la Tabla 17 se establecen los costos de capacitación en la operación y mantenimiento de aerogeneradores en las estrategias tradicionales de 18714.1 USD que supone el 2% con respecto a los costos totales anuales realizados por la empresa alemana Deutsche Gesellschaft für

Internationale Zusammenarbeit para el Programa de Asistencia Técnica con base en Energías Alternativas y se establece de igual manera los costos en la inversión para la capacitación en el entrenamiento virtual con el modelo de propuesta en equipos sumados con sueldo de instructores de 16800 USD en el primer año.

Para el segundo año la inversión con el modelo de propuesta radica exclusivamente en el pago de sueldo de instructores en 4 sesiones de capacitación al año, lo cual supone 4800 USD.

La comparación en los valores de estas estrategias evidencia un ahorro del 10.22 % equivalente a 1914.1 USD en el primer año, y a partir del segundo año se evidencia un ahorro del 74.35 % equivalente a 13914.1 USD.

Tabla 17

Comparación de Costos entre las estrategias de Mantenimiento

Descripción	Estrategias	Modelo de	Ahorro (USD)
	Tradicionales	Propuesta	
	Inversión en	Inversión en	
	Capacitación	Capacitación (USD)	
	(USD)		
1er año	18714.1	16800	1914.1
2do año	18714.1	4800	13914.1

Nota. Se detalla la comparación de los costos de capacitación en la operación y mantenimiento de aerogeneradores entre las estrategias tradicionales y el modelo de propuesta.

Desgaste de los componentes del aerogenerador

Por una parte el desgaste de los componentes del aerogenerador, como el buje, palas, la torre y otros componentes externos son por fenómenos físicos, agentes externos, erosión y corrosión como se observa en la Figura 61 (Díez, 2002).

Por otra parte, los trabajos de mantenimiento requieren capacitación, por lo que tradicionalmente el instructor y el personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores interactúan físicamente con herramientas y materiales en los componentes del aerogenerador un sinnúmero de veces hasta lograr el objetivo de mantenimiento y evitar errores.

Figura 61

Desgaste en Palas



Nota. Se observan grietas, daños por rayos, desgaste por erosión, roturas en las palas. Recuperado de (Díez, 2002).

Con el entrenamiento virtual, el instructor y el personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores interactúan con los componentes del aerogenerador en un proceso de simulación. Este proceso virtual hace que el usuario tenga una experiencia previa antes de su primera interacción física con los componentes del aerogenerador en el proceso de mantenimiento requerido. Es decir, la cantidad de veces que se necesite desarmar algún componente es mucho menor a la cantidad de veces

que se desarmen actualmente los componentes de los aerogeneradores con la interacción de herramientas y materiales que continuamente desgasta al aerogenerador.

En la Tabla 18 se observa la comparación con el indicador de desgaste de los componentes por fenómenos físicos, número de veces de interacción con el componente y la parte económica.

Tabla 18

Comparación de Desgaste de los componentes

Estrategias Tradicionales	Modelo de Propuesta
Los efectos de corrosión, erosión, rayos afectan a componentes como las palas, el buje, el interior de la torre, entre otros.	Los fenómenos físicos de una u otra forma van a seguir desgastando a los componentes externos e internos del aerogenerador.
El componente del aerogenerador se desarma un sinnúmero de veces hasta que el personal técnico de mantenimiento quede totalmente capacitado.	El componente del aerogenerador se desarma menos veces porque el usuario ya tiene una experiencia virtual.

Nota. Se compara el desgaste de los componentes entre las estrategias tradicionales y el modelo de propuesta.

Tiempo en tareas de mantenimiento

Según el Protocolo IRIM 202410 detallado en la sección 2.11 del presente trabajo de titulación indica que los tiempos en las tareas de mantenimiento tradicional se basan en dos tipos de inspección. Las primeras, consisten en inspecciones de carácter trimestral considerando unas 3 horas de trabajo por aerogenerador. Estas tareas se basan en la inspección de los elementos que conforman la góndola, la

cimentación y la parte inferior del aerogenerador como por ejemplo la verificación de marcas de apriete de pernos de sujeción de palas en el buje.

Los segundos tipos de inspección son de carácter anual que consisten en tareas cuyas fallas potenciales que se tratan de detectar tienen un período de generación más largo como por ejemplo la verificación del apriete de tornillos en la tapa de la multiplicadora.

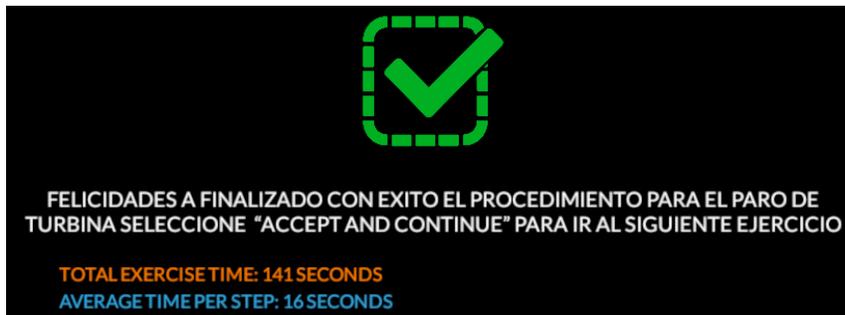
De acuerdo a (Renovetec, 2018) más del 90% de las tareas son inspecciones sensoriales, es decir se realizan inspecciones en los componentes viendo, oyendo, tocando, u oliendo. Conjuntamente a las tareas de inspección sensorial se complementan tareas de verificación de funcionamiento en el sistema de frenado, la puesta en marcha del aerogenerador y el pitch control, el cual regula el ángulo de paso de las palas del rotor. Finalmente se complementan tareas de carácter sistemático que consiste en tareas de engrase y lubricación de ciertos elementos como los anclajes y pastillas de freno o tareas de limpieza en superficies con el uso de herramientas y materiales.

El modelo de propuesta del trabajo de titulación permite que el personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores se vea en constante aprendizaje y práctica dentro del entorno de simulación virtual. Las iteraciones y el repetido monitoreo de las tareas de mantenimiento en Simulwind permiten trabajar con tiempos menores a las simulaciones anteriores.

Por ejemplo, en la Figura 62 se aprecia el tiempo de demora en una primera simulación de un ejercicio para la secuencia de paro del aerogenerador con un tiempo de 141 segundos para interactuar con 4 botones de la cabina de control en un orden específico.

Figura 62

Tiempo en la primera simulación de Paro de Turbina

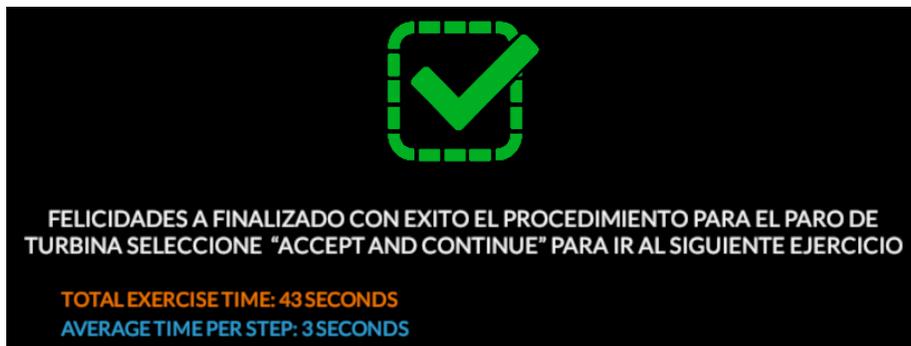


Nota. Se observa el mensaje con el tiempo de simulación de 141 segundos en Simulwind

Se manifiesta entonces que el usuario en la constante repetición de la misma simulación de la secuencia de paro del aerogenerador disminuye el tiempo de trabajo de la tarea de mantenimiento como se aprecia en la Figura 63 el tiempo de 43 segundos en la demora de la misma simulación para interactuar con 4 botones de la cabina de control en un orden específico.

Figura 63

Tiempo en la próxima simulación de Paro de Turbina



Nota. Se observa el mensaje con el tiempo de simulación de 43 segundos en Simulwind.

En la Tabla 19 se aprecia los tiempos en las simulaciones de las tareas realizadas en Simulwind.

Tabla 19*Tiempos de simulación de prácticas en Simulwind*

Lista de Prácticas	Ejercicios	Tiempo en la primera simulación (segundos)	Tiempo en la siguiente simulación (segundos)
Sistema de frenado	Paro de Aerogenerador.	260	197
	Programación Control Yaw.	310	241
	Verificación de eje lento y rotor.	372	297
	Frenado y Lubricación del Eje Rápido	384	254
	Control Pitch	310	268
Mecanismo de Orientación de Palas	Inspección de Puerta.	400	301
	Inspección en parte baja de la	680	429
	Torre. Inspección en parte media de la Torre.	650	357
	Góndola, carcasa, corona	700	367
	Multiplicadora	Inspección de Multiplicadora	1300
Generador	Verificar el aspecto general del exterior del generador	460	356
	Verificación de anclajes	432	236

Lista de Prácticas	Ejercicios	Tiempo en la primera simulación (segundos)	Tiempo en la siguiente simulación (segundos)
Rotor (Bue y Palas)	Inspección Visual del conjunto	420	265
	Detección de roturas y fisuras en el buje y palas	410	321
	Inspección del estado superficial de las palas	560	436
	Inspección del sistema de regulación de las palas.	540	325
	Estado del apriete de tornillos	540	325
Transmisión Mecánica (Ejes, acoplamientos)	Situación de los rodamientos	580	300
	Situación de los acoplamientos	520	265
	Situación de anclajes	472	225
	Lubricación	500	250
Total		10800	

Nota. Se detallan los tiempos en las simulaciones de las tareas en Simulwind registrando un total de 10800 segundos equivalente a 3 horas aproximadamente.

Como se analiza en la Tabla 20, el proceso de entrenamiento virtual repetitivo en las tareas de mantenimiento permite que el personal técnico de mantenimiento disminuya el tiempo de interacción con los componentes reales y físicos del aerogenerador ya que se ha realizado varias prácticas de

simulación virtual y se encuentra listo intelectualmente con los tiempos y diversos factores adversos para su primera práctica real.

Tabla 20

Comparación de tiempos en tareas de mantenimiento

Estrategias Tradicionales	Modelo de Propuesta
De acuerdo al protocolo IRIM 202410 el tiempo empleado en la inspección de cada aerogenerador oscila entre las 4 y 8 horas.	Los tiempos en la inspección de cada aerogenerador estiman 3 horas

Nota. Se detalla la comparación del tiempo en las tareas de inspección de los componentes entre las estrategias tradicionales y el modelo de propuesta.

De tal manera entonces el tiempo en la tarea de mantenimiento con el modelo de propuesta es menor que el tiempo en el mantenimiento de las estrategias tradicionales de aproximadamente la mitad de horas considerando las veces que el usuario realice una misma simulación antes de ponerla en práctica en la vida real.

Niveles de preparación y experiencia frente a situaciones de manejo de herramientas de uso en aerogeneradores

Para saber la efectividad del modelo de propuesta de simulación virtual y considerar los resultados del personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores con la familiarización del software es necesario una encuesta que valide el proyecto.

La simulación del modelo de propuesta de mantenimiento eólico ha sido desarrollada para profesionales técnicos en el área de mantenimiento, simulación y control. Posterior a ello se realizó un modelo de encuesta de 10 preguntas a profesionales que laboran en diversas empresas y también a estudiantes en Universidades con conocimientos en ingeniería del mantenimiento y energías alternativas como se observa a detalle en el Anexo E de encuesta de validación de proyecto, utilizando la herramienta de Formularios de Google Drive, y cuyos resultados se indican a continuación.

Resultados de la Encuesta

En las Figuras 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72 y 73 se observan el porcentaje del total de 20 encuestados, quienes respondieron con una afirmación o negación a cada una de las preguntas.

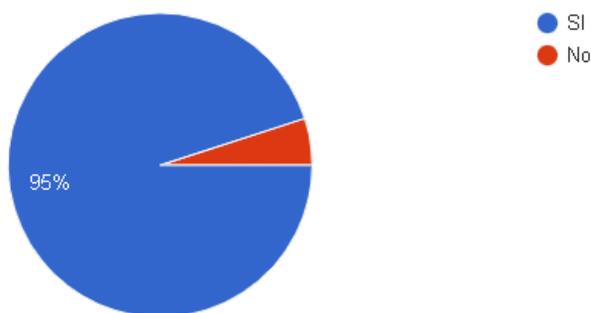
1. ¿El sistema de entrenamiento es amigable?

R1. SI, R2. NO

Figura 64

Resultado de la primera pregunta

20 respuestas



Nota. Se observa un 95% de encuestados que respondieron con afirmación y un 5% que respondieron con negación.

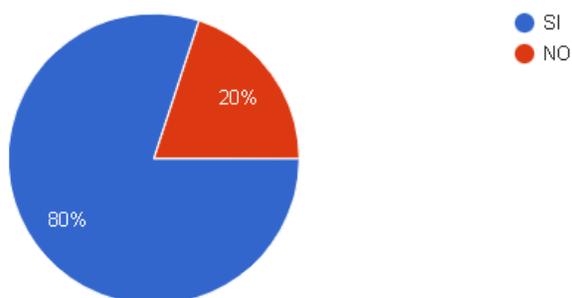
2. ¿La experiencia con el simulador ha sido satisfactoria?

R1. SI. R2.NO

Figura 65

Resultado de la segunda pregunta

20 respuestas



Nota. Se observa un 80% de encuestados que respondieron con afirmación y un 20% que respondieron con negación.

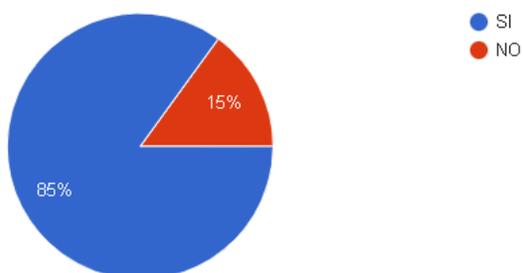
3. ¿El entorno virtual presenta una buena calidad gráfica y realismo?

R1. SI, R2. NO

Figura 66

Resultado de la tercera pregunta

20 respuestas



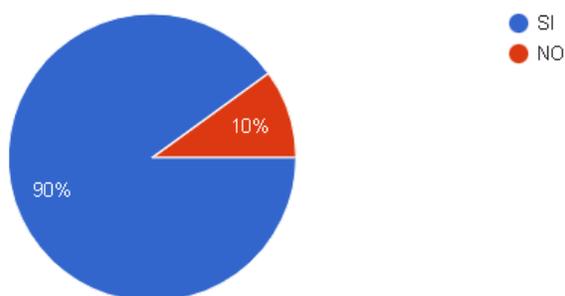
Nota. Se observa un 85% de encuestados que respondieron con afirmación y un 15% que respondieron con negación.

4. ¿La interacción del usuario con los instrumentos y equipos de protección personal es satisfactoria?

R1. SI, R2. NO

Figura 67*Resultado de la cuarta pregunta*

20 respuestas



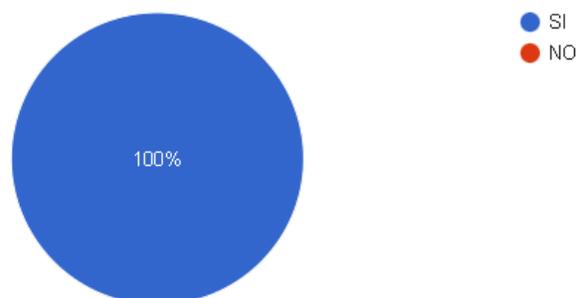
Nota. Se observa un 90% de encuestados que respondieron con afirmación y un 10% que respondieron con negación.

5. ¿El entrenamiento guiado es claro y entendible?

R1. SI, R2. NO

Figura 68*Resultado de la quinta pregunta*

20 respuestas



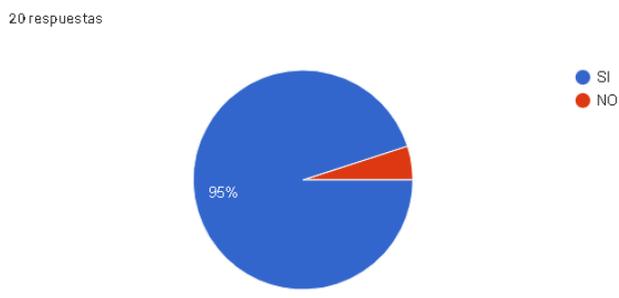
Nota. Se observa un 100% de encuestados que respondieron con afirmación.

6. ¿La simulación presentada en el video es adecuada y presenta todos los parámetros importantes?

R1. SI, R2. NO

Figura 69

Resultado de la sexta pregunta



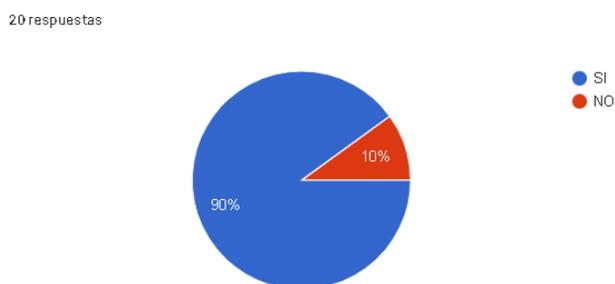
Nota. Se observa un 95% de encuestados que respondieron con afirmación y un 5% que respondieron con negación.

7. Luego de hacer uso del sistema de entrenamiento, ¿cree usted que se puede tener mejores resultados en comparación a estrategias tradicionales de mantenimiento?

R1. SI, R2 .NO

Figura 70

Resultado de la séptima pregunta



Nota. Se observa un 90% de encuestados que respondieron con afirmación y un 10% que respondieron con negación.

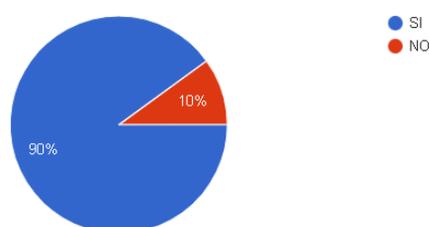
8. ¿Cree usted que el procedimiento implementado permite al personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores conseguir indicadores con altos niveles de preparación y experiencia en el manejo de herramientas en aerogeneradores?

R1. SI, R2. NO

Figura 71

Resultado de la octava pregunta

20 respuestas



Nota. Se observa un 90% de encuestados que respondieron con afirmación y un 10% que respondieron con negación.

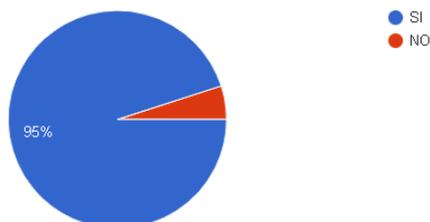
9. ¿El simulador permite obtener un alto indicador en la manipulación virtual de herramientas de operación de trabajo eólico?

R1. SI, R2. NO

Figura 72

Resultado de la novena pregunta

20 respuestas



Nota. Se observa un 95% de encuestados que respondieron con afirmación y un 5% que respondieron con negación.

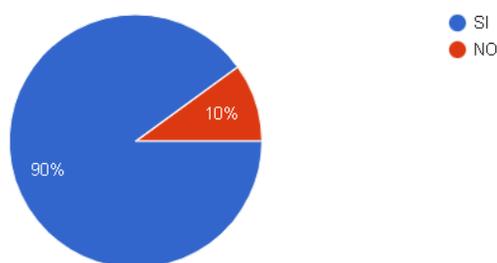
10. ¿Cree usted que el procedimiento implementado en este proyecto aumenta la seguridad laboral del personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores frente a situaciones de riesgo?

R1. SI, R2. NO

Figura 73

Resultado de la décima pregunta

20 respuestas



Nota. Se observa un 90% de encuestados que respondieron con afirmación y un 10% que respondieron con negación.

En base a los resultados, se presenta en la Tabla 21 el resumen de los porcentajes de las respuestas de afirmación o negación por parte de los encuestados con el modelo de propuesta de entrenamiento virtual frente a las estrategias tradicionales de mantenimiento; en donde se registra un promedio del 91% de encuestados que están de acuerdo con el sistema de entrenamiento virtual.

Tabla 21*Resultados en porcentaje de la encuesta de validación*

Preguntas	Si	No
1. ¿El sistema de entrenamiento es amigable?	95%	5%
2. ¿La experiencia con el simulador ha sido satisfactoria?	80%	20%
3. ¿El entorno virtual presenta una buena calidad gráfica y realismo?	85%	15%
4. ¿La interacción del usuario con los instrumentos y equipos de protección personal es satisfactoria?	90%	10%
5. ¿El entrenamiento guiado es claro y entendible?	100%	0%
6. ¿La simulación presentada en el video es adecuada y presenta todos los parámetros importantes?	95%	5%
7. Luego de hacer uso del sistema de entrenamiento, ¿cree usted que se puede tener mejores resultados en comparación a estrategias tradicionales de mantenimiento?	90%	10%
8. ¿Cree usted que el procedimiento implementado permite al personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores conseguir indicadores con altos niveles de preparación y experiencia en el manejo de herramientas en aerogeneradores?	90%	10%
9. ¿El simulador permite obtener un alto indicador en la manipulación virtual de herramientas de operación de trabajo eólico?	95%	5%

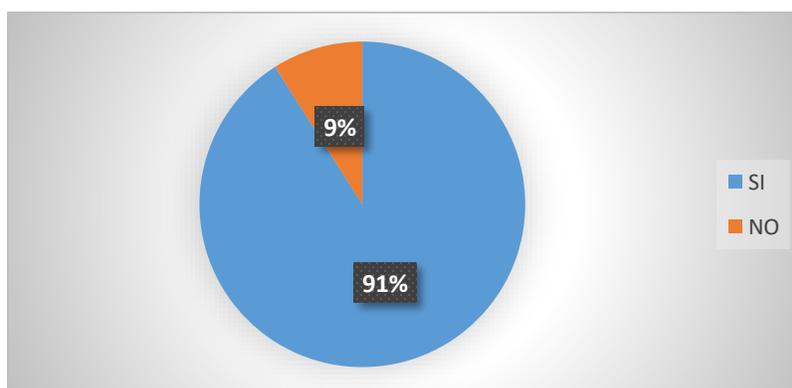
Preguntas	Si	No
10. ¿Cree usted que el procedimiento implementado en este proyecto aumenta la seguridad laboral del personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores frente a situaciones de riesgo?	90%	10%
Promedio	91%	9%

Nota. Se observa los porcentajes de respuestas de afirmación o negación a cada una de las preguntas de la encuesta.

En la Figura 74 se observa gráficamente el promedio del porcentaje de aceptación del modelo de propuesta frente a otras estrategias tradicionales de mantenimiento.

Figura 74

Promedio de aceptación del modelo de propuesta



Nota. Se observa el promedio en porcentaje de la encuesta con respecto a la aceptación y no aceptación al sistema de entrenamiento virtual para la capacitación en la formación de nuevos profesionales del mantenimiento en aerogeneradores.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se recolectó información necesaria e importante sobre las estrategias de mantenimiento actual y tradicional de aerogeneradores en sectores de América y Europa que dominan el mercado de energías alternativas, en donde se evidenció que el mantenimiento en tecnologías offshore se encuentran en evolución; mientras que las tecnologías onshore están dominadas por las estrategias preventivas como el mantenimiento periódico, el mantenimiento basado en la condición, el mantenimiento basado en la confiabilidad y estrategias reactivas como la eliminación de averías que representan el 60% de los daños del aerogenerador presentes en el sistema mecánico como engranajes y cojinetes, ya sea por la rotura o el desgaste del material.
- Se elaboró un modelo de propuesta de mantenimiento eólico que tiene una estructura basada en el mantenimiento productivo total (TPM), y que aprovecha los beneficios de la mejora continua bajo el enfoque de la Industria 4.0 en el entrenamiento virtual de las tareas de mantenimiento en los principales componentes del aerogenerador con el uso de un software de simulación “Simulwind” que satisface la necesidad formativa en la capacitación de nuevos profesionales ligados al sector de operación eólica.
- Se creó bajo el lenguaje de Marcado de Hipertexto (HTML) en el software de simulación eólico las prácticas de entrenamiento virtual de acuerdo al modelo de propuesta de actividades y componentes de mantenimiento del aerogenerador. Las prácticas que se crearon en el software fueron correspondientes a las tareas de mantenimiento en: sistema de frenado del eje rápido, control del rotor orientado en la dirección del viento (*Yaw Control*), tareas en el mecanismo de

orientación de palas (Pitch Control), en la góndola, en la carcasa, tareas en el mantenimiento en torre, tareas en la multiplicadora, en el generador, rotor (buje y palas) y tareas en la transmisión mecánica (ejes, acoplamientos).

- Se implementó y desarrolló en el software cada una de las prácticas basadas en el modelo de propuesta, con las cuales el usuario accede al entrenamiento virtual en su capacitación con las tareas de mantenimiento correspondientes a los principales componentes del aerogenerador.
- Se estableció una comparación de indicadores con igual o mejores resultados entre el modelo de propuesta de mantenimiento eólico con respecto a las tradicionales. Así por ejemplo en el primer año del total de 18714.1 USD en costos de capacitación en la operación y mantenimiento de aerogeneradores en las estrategias tradicionales se reducen a 16800 USD equivalente a un ahorro del 10.22 % con el modelo de propuesta, y para el segundo año se reduce a 4800 USD equivalente a un ahorro del 74.35 %.
- El desgaste en los componentes del aerogenerador con el modelo de propuesta se prevé que se reduzca, considerando que los elementos se desarmen menos veces porque el usuario ya tiene una experiencia virtual con la manipulación de herramientas y materiales. Esto supone también que a lo largo de la vida útil del aerogenerador sean menos los cambios de los juegos y repuestos que conforman los componentes del aerogenerador.
- El tiempo en la tarea de mantenimiento con el modelo de propuesta en la inspección de cada aerogenerador se establece en 3 horas, lo cual implica que es menor al tiempo en el mantenimiento de las estrategias tradicionales que bajo el Protocolo IRIM 202410 suponen un intervalo entre 4 a 8 horas.

- Bajo la encuesta de validación del proyecto se evidenció un promedio del 91% de los encuestados que aceptan el sistema de entrenamiento virtual, considerando que, bajo el procedimiento aplicado, el usuario adquiere altos niveles de preparación y experiencia en el manejo de herramientas en aerogeneradores. Paralelamente los encuestados indicaron el aumento de la seguridad laboral e integral de los trabajadores frente a situaciones de riesgo con respecto a estrategias tradicionales.
- Con el enfoque a la industria 4.0 los beneficios analizados indican el trabajo eficiente, colectivo y común de la empresa. Técnicamente se aprovecha el rendimiento máximo de los equipos con el programa de simulación virtual que permite la capacitación del personal técnico de mantenimiento en aerogeneradores para intervenir en el equipo y establecer óptimas condiciones de funcionamiento de los componentes del aerogenerador.
- Simulwind es una herramienta de entrenamiento para la sostenibilidad de los parques eólicos que se seleccionó por la viabilidad de los costos de adquisición (software libre) y que permite al usuario aprovechar el modelo 3D de aerogenerador tripala de eje horizontal propio del simulador.

Recomendaciones

- En la realización de las prácticas en Simulwind considerar aspectos y características de los objetos del modelo 3D de aerogenerador que faciliten la interacción de sus propiedades para la programación y creación de las tareas de mantenimiento.
- Se recomienda en trabajos próximos el uso de Simulwind con la interacción de Blender y Unity en futuras versiones en la creación de otros modelos 3D de aerogeneradores que el usuario

desea realizar para el estudio e investigación en Energías Alternativas, diferentes al modelo tripala de eje horizontal que viene cargado por defecto en el software.

- Considerar el uso de Simulwind en el estudio y aplicación en otras áreas de conocimiento como por ejemplo en la investigación de máquinas eléctricas y afines con la información de los componentes y prácticas necesarias en el modelado 3D.
- Se recomienda en trabajos futuros realizar una comparación de indicadores en la implementación que presenten los resultados de tareas entre Simulwind y nuevos softwares de entrenamiento virtual en aerogeneradores que se encuentren disponibles en la red considerando nuevas estrategias de mantenimiento y otros equipos de realidad virtual.

Bibliografía

Acciona. (2016). *Sostenibilidad-Acciona*. Obtenido de

<https://www.youtube.com/watch?v=kmN9qD8vXbY>

AEE. (2017). *Asociación Empresarial Eólica*. Obtenido de <https://www.simulwind.com/>

Airpes. (2020). *Airpes*. Obtenido de <https://www.airpes.com/es/diferencia-entre-los-parques-eolicos-terrestres-y-maritimos/>

Alcobendas. (2018). *Industria Energía y Medio Ambiente*. Obtenido de

<https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>

Altran. (2018). *Plataforma de Mantenimiento basado en la condición (CBM)*. Obtenido de

<https://blog.altran.es/industria-energia/mantenimiento-basado-en-condicion-cbm/#:~:text=El%20mantenimiento%20basado%20en%20condici%C3%B3n,baja%20implementaci%C3%B3n%20de%20Mantenimiento%20Predictivo.>

Amayri, A., & Tian, Z. (2011). Condition Based Maintenance of Wind Turbine.

Asociación Empresarial Eólica. (2020). *La eólica en el mundo*. Obtenido de

<https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20instalada%20en,son%20los%20primeros%20productores%20mundiales.>

Ballesteros, F. (2017). *La Estrategia Predictiva en el mantenimiento industrial*.

Barragán, A. (2012). *Análisis, especificación y desarrollo de procedimientos de operación para la gestión de la energía eólica en Ecuador*. Cuenca.

Basco, A. (2018). *Industria 4.0 Fabricando el Futuro*.

BZEE. (2017). *The industry standar for training excellence in wind turbine*. Obtenido de https://www.simulwind.com/datei/de/terms-of-use-and-licence_33.pdf

CAF. (2015). Obtenido de Banco de Desarrollo de América Latina:

<https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2015/08/energia-eolica-en-america-latina-3-aspectos-claves-a-conocer/>

Campilla, L. (2020). El mercado de la energía eólica en Canadá. *ICEX España*.

CELEC. (2021). *Corporación Eléctrica del Ecuador*. Obtenido de

<https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/67-central-eolica-villonaco-genera-el-152-de-lo-planificado>

Centraleólica. (2018). *Centraleólica*. Obtenido de <https://centraleolica.wordpress.com/partes-de-un-aerogenerador/>

CIC. (2017). *Consulting Informático . Industria 4.0 la cuarta revolución industrial y la inteligencia operacional*. Obtenido de <https://www.cic.es/industria-40-revolucion-industrial/>

Cobo, G. (2017). *Desarrollo de una aplicación móvil de realidad*.

Cobreiro, P. (2014). *Aerogeneradores. Medidas de prevención y protección durante el mantenimiento*.

Cobreiro, P., & Jiménez, S. (2014). *Notas Técnicas de Prevención, Riesgos Laborales en las Operaciones de Mantenimiento*.

Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Registro Oficial No. 449*.

Díez, P. F. (2002). *Energía Eólica*.

Drommi, F. (2017). Enfoque estadístico reduce los costos de operación de las turbinas eólicas.

EVOLUTION Revista de tecnología de SKF.

ELECGALÁPAGOS. (2021). *Empresa Eléctrica de Galápagos*. Obtenido de

<https://www.elecgapagos.com.ec/pdf2015/centrales.pdf>

Energía y Sociedad. (2017). *Manual de la Energía*. Obtenido de

<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/1-1-que-es-la-eficiencia-energetica/>

Energiza. (2018). *El árbol jerárquico de activos*. Obtenido de

http://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1065:el-%C3%A1rbol-jer%C3%A1rquico-de-activos-de-una-central-de-ciclo-combinado

Energiza. (2018). Funcionamiento de la multiplicadora de un aerogenerador.

ENGEMAN. (2018). *Mantenimiento basado en la Confiabilidad, RCM (Reliability Centred Maintenance)*.

Obtenido de

<https://blog.engeman.com/es/rcm/#:~:text=El%20Mantenimiento%20Centrado%20en%20la%20Confiabilidad%20es%20un%20m%C3%A9todo%20estructurado,con%20el%20menor%20costo%20posible.>

Facultad Informática de Barcelona. (2021). *Retro Informática El Pasado del Futuro*. Obtenido de

<https://www.fib.upc.edu/retro-informatica/avui/realitatvirtual.html>

García Garrido, S. (2019). *Aerogeneradores y su Mantenimiento*.

Gentillon, P. (2009). *Energía Eólica: alumnos USM fabrican innovador aerogenerador tipo Savonius*.

Obtenido de <https://noticias.usm.cl/2009/11/12/energia-eolica-alumnos-usm-fabrican-innovador-aerogenerador-tipo-savonius/>

Giraldo, M. (2021). *Research Gate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Aerogenerador-tipo-Darrieus_fig1_267800378)

[Aerogenerador-tipo-Darrieus_fig1_267800378](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Aerogenerador-tipo-Darrieus_fig1_267800378)

GIZ. (2018). *Estudio de determinación de Costos de Operación, Mantenimiento y administración fijos de*

Generación con base en Energías Alternativas. Obtenido de

https://energypedia.info/images/e/e2/Estudio_Costos_Fijos_OMA-Generacion_SOLAR_FV.pdf

Gobierno del Ecuador. (2019). *Ley Orgánica de Eficiencia Energética*.

GWEC. (2020). Market Intelligence.

HeTech Marposs. (2013). *helium technology*. Obtenido de

<http://www.heliumtechnology.com/es/maintenance/#:~:text=Consiste%20en%20el%20conjunto%20de,del%20sistema%20en%20el%20tiempo.>

Infobae. (2018). *RSE y sustentabilidad*. Obtenido de <https://www.infobae.com/2016/03/13/1796528->

[los-paises-mayor-produccion-energia-](https://www.infobae.com/2016/03/13/1796528-)

[eolica/#:~:text=Alemania%2C%20China%2C%20Estados%20Unidos%20e,del%20movimiento%2](https://www.infobae.com/2016/03/13/1796528-)

[0de%20sus%20aspas.](https://www.infobae.com/2016/03/13/1796528-)

Innoarea Projects. (2021). *Industria 4.0 a través de Realidad Virtual y Realidad Aumentada*. Obtenido de

<https://innoarea.com/noticias/industria-4-0-a-traves-de-realidad-virtual-y-realidad-aumentada/>

IRENA. (2020). *International Renewable Energy Agency*. Obtenido de <https://www.irena.org/wind>

IRIM. (2015). *El Mantenimiento de Aerogeneradores*. Obtenido de <http://renovetec.com/irim/267-EL-MANTENIMIENTO-DE-AEROGENERADORES>

ISOTools. (2018). *Blog Calidad y Excelencia*.

Izanda. (2015). *Izanda, Portable Machine Tools*. Obtenido de <https://www.izanda.com/repara-frenos-aerogenerador/>

Jaramillo, A. (2014). Obtenido de Fuentes de Energía, partes de un Aerogenerador:

<https://triplep97.wordpress.com/energia-eolica/aerogeneradores/partes-de-un-aerogenerador/>

Jaramillo, F. (1979). *Procedimientos de Operación y Control de una unidad generadora operada con turbina a gas*.

Jaramillo, P. (2005). *Diseño y Simulación de los Componentes de un aerogenerador modelo para la provincia de Loja*. Loja.

K. Seiche. (2007). Fledermäuse und Windenergieanlagen in Sachsen. *Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2007*.

LATAM. (2021). *Energía Estratégica*. Obtenido de <https://www.energiaestrategica.com/gwec-america-del-norte-y-latinoamerica-aumentaron-las-instalaciones-de-energia-eolica-en-un-62-en-2020/>

López, H. (2016). *Propuesta de un modelo para el mejoramiento integral del mantenimiento de los sistemas de generación de energía eólica en México*. México.

Lugo, X. (2018). *Parque Eólico Experimentl Sotavento*. Obtenido de

<https://www.sotaventogalicia.com/area-tecnica/instalaciones-eolicas/funcionamiento/>

- MAE. (2013). *Ministerio del Ambiente y Agua*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-promueve-la-eficiencia-energetica-a-nivel-nacional/#:~:text=En%20Ecuador%2C%20la%20Eficiencia%20Energ%C3%A9tica,%2Fdireccion%2Dde%2Deficiencia%2D>
- Marrero, R. A. (2019). Modelo de diagnóstico-planificación y control del mantenimiento.
- Martínez, L. (2016). *El Economista*. Obtenido de <https://www.economista.com.mx/empresas/El-estado-de-la-energia-eolica-en-America-Latina-20161120-0024.html>
- Mejer, J. (2020). *BZEE Academy GmbH*. Obtenido de <https://ee-sh.de/de/unternehmensverzeichnis/unternehmen/BZEE-Academy-GmbH.php>
- Méndez, N. (2018). PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO DE AEROGENERADORES USANDO TECNOLOGÍA. En N. Méndez.
- Mendoza, F. (4 de Noviembre de 2021). *El telégrafo Ecuador*. Obtenido de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/empresas-espanolas-concesion-proyectos-villonaco-ii-y-iii-aromo>
- MERNNR. (2021). *Ministerio de Energía y Recursos Naturales NoRenovables*. Obtenido de <https://www.rekursyenergia.gob.ec/>
- Miranda, S. (2018). Maintenance for Sustainability in the Industry 4.0 context:. *IFAC. Conference paper archive* .
- Moreno, C. P. (2017). *Plan de Mantenimiento de un Aerogenerador Offshore*. Cartagena.
- Nandipati, S., Nichenametla, A. N., & Waghmare, A. L. (2018). Cost-Effective Maintenance Plan for Multiple Defect Types in Wind.

NTE INEN-IEC 61400-25-2. (2014). *EL CONTROL DE PARQUES EÓLICOS – MODELOS DE INFORMACIÓN*

(IEC 61400-25-2:2006, IDT). Pimera.

Ochoa, D. (2016). *ResearchGate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-general-del-aerogenerador-doblemente-alimentado_fig1_311654081)

[general-del-aerogenerador-doblemente-alimentado_fig1_311654081](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-general-del-aerogenerador-doblemente-alimentado_fig1_311654081)

Pilz. (2018). *Automatización eficiente y segura de aerogeneradores*. Obtenido de

<https://www.pilz.com/es-MX/products/industry/energy>

Ramírez. (2014). *Gestión del Conocimiento, Energías Renovables*. Obtenido de

<https://gcmula.wordpress.com/2014/04/15/offshore-vs-onshore/>

Raso, C. (2015). *Bajan los costes de mantenimiento de los parques eólicos*. Obtenido de

<https://www.eleconomista.es/energia/noticias/6832985/06/15/Bajan-los-costes-de-mantenimiento-de-los-parques-eolicos.html>

Ree. (2021). *Red Eléctrica de España*. Obtenido de <https://www.ree.es/es>

Renovables, C. d. (2008). *Energías Renovable 2008 - Energía Eólica*.

Renovetec. (2018). *Aerogeneradores y su Mantenimeinto* .

Reoltec. (2019). Obtenido de Proyecto Simulwind: una herramienta innovadora para la formación en

mantenimiento eólico.

Roca, J. A. (2015). Obtenido de El Periódico de la Energía . Los 10 mayores parques eólico terrestres del

mundo: <https://elperiodicodelaenergia.com/los-10-mayores-parques-eolicos-terrestres-del-mundo/>

RocketContent. (2021). *Conoce la realidad aumentada y las posibilidades de interacción que la hacen sobresalir en el mundo digital*. Obtenido de <https://rockcontent.com/es/blog/realidad-aumentada/>

Roldán, J. (2013). *Energías Renovables, lo que hay que saber*.

Saia, C. (2021). *Desarrollo De Juegos Con Unity*. Obtenido de <https://www.cecideviaje.com/desarrollo-de-juegos-con-unity/>

Santos, A. (2008). *Mantenimiento de Aerogeneradores*.

Saxena, B. K., & Rao, K. V. (2013). Wind Turbine Failure Analysis for Wind Farm at.

Simulwind. (2017). *Maintenance simulator: A TRAINING TOOL for the sustainability of European wind farms*. Obtenido de <https://www.simulwind.com/>

Sion, A. (2013). *Energía Eólica - Aerogenerador Eje Horizontal y sus partes*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=0MgPhKCpuas>

Smith, D. J. (2001). Reliability, Maintainability and risk.

Sputnik. (2021). *América Latina*. Obtenido de <https://mundo.sputniknews.com/20210421/los-vientos-soplan-a-favor-de-la-energia-eolica-en-america-latina-3-paises-destacan-1111419962.html>

Structuralia. (2015). Obtenido de <https://blog.structuralia.com/el-mayor-parque-eolico-de-america-latina-el-complejo-campos-neutrais>

T. Muuß. (2005). Condition Monitoring Systeme für Windenergieanlagen. *WindEnergie, Hamburg 2005*.

TECH4CDM. (2008). Proyecto TECH4CDM.

Tesicnor. (2012). *Guía de buenas prácticas para la consignación de aerogeneradores en las operaciones de explotación y mantenimiento.*

Thinair, D. (2010). *flyer*. Obtenido de <http://flyerone09.blogspot.com/2010/01/thinair-la-magia-del-monopala.html>

Ubits. (2019). *Ubits Learning Solutions*. Obtenido de <https://ubits.mx/blog/negocios/sabes-como-maximizar-el-presupuesto-de-capacitacion-en-tu-compania/>

Valuekeep. (2021). *Mantenimiento 4.0*. Obtenido de <https://valuekeep.com/es/recursos/e-books-articulos/mantenimiento-4-0/>

Velásquez, E. (2019). *Asociación Empresarial Eólica*. Obtenido de <https://www.aeeolica.org/comunicacion/aee-opina/3973-simulwind-una-herramienta-formativa-de-la-era-digital-por-elena-velazquez-ingeniera-de-proyectos-de-aee>

Veluwemeer, J. (2021). *dreamstime*. Obtenido de <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-turbina-de-viento-bipala-debajo-del-cielo-azul-image82204786>

Vilaragut, M. (2014). *Análisis y modelado del generador de inducción doblemente alimentado.*

Villar, M. (2017). *Energía VM*. Obtenido de <https://www.energyavm.es/el-generador-eolico-como-funciona-y-que-usos-tiene/>

Viñuela, V. (Junio de 2012). *Mercados Eléctricos - IEE3372*. Obtenido de https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/C._Eolica.html

Wang, D., Liu, Y., Cao, X., Jiang, Y., & Ding, P. (2020). A research on the Monte Carlo simulation based on-condition maintenance.

WindEurope. (27 de Abril de 2021). *Wind Power Numbers Daily* . Obtenido de

<https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/top-countries>

WindPower. (2003). *Danish Wind Industry Association*. Obtenido de [http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-](http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/econ/oandm.htm)

[content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/econ/oandm.htm](http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/econ/oandm.htm)

World Energy Trade. (2021). Obtenido de [https://www.worldenergytrade.com/energias-](https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/la-energia-eolica-en-espana-logra-en-2021-su-mayor-produccion-electrica-de-los-ultimos-15-anos)

[alternativas/energia-eolica/la-energia-eolica-en-espana-logra-en-2021-su-mayor-produccion-electrica-de-los-ultimos-15-anos](https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/la-energia-eolica-en-espana-logra-en-2021-su-mayor-produccion-electrica-de-los-ultimos-15-anos)

Wright, J. (2020). *Gestión del Mantenimiento para la Industria 4.0*. Obtenido de

<https://visionindustrial.com.mx/industria/operacion-industrial/gestion-del-mantenimiento-para-la-industria-4-0>

Y. D. Pernia Mora. (2013). *Betriebs- und Instandhaltungsstrategie einer*.

ANEXOS