

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE REALIDAD VIRTUAL INMERSIVA
PARA EL ADIESTRAMIENTO EN EL ÁREA DE MANTENIMIENTO EN
AEROGENERADORES.**

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno:

José Patricio Ognio Díaz

Profesor Guía:

PhD. Ing. Carlos Alberto Parra Márquez

2024

RESUMEN

El objetivo es desarrollar un modelo de aprendizaje inmersivo utilizando un prototipo parcial de simulador de realidad virtual (RV) a través de la plataforma de desarrollo de videojuegos llamada Unity. El propósito principal es disponer de una herramienta de capacitación que pueda entrenar a futuros técnicos de mantenimiento, con el fin de mejorar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de la turbina eólica Vesta V100-2.0 [MW] del parque eólico valle de los vientos.

Este modelo se basará en la metodología de gestión de activos, específicamente la técnica de análisis de modos y efectos de fallos (AMEF). Este método se utiliza para identificar y evaluar los posibles modos de fallos de un sistema, así como sus efectos y consecuencias. Posteriormente, esta información se ingresará en la aplicación de adiestramiento, lo que permitirá identificar posibles fallos, analizar sus causas y consecuencias, y desarrollar estrategias de mantenimiento preventivo.

KEYWORDS: Modelo de aprendizaje inmersivo, Prototipo de simulador de realidad virtual (RV), Técnica de análisis de modo y efectos de fallos (AMEF), Herramienta de capacitación, futuros técnicos en mantenimientos, prevención de errores humanos, confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	5
1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. REALIDAD VIRTUAL EN LA CAPACITACIÓN	7
1.1.1. Descripción de los tipos de adiestramiento	7
1.1.2. Dispositivos de realidad virtual.....	8
1.2. METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO EN UN ENTORNO REALIDAD VIRTUAL	11
1.2.1. Referencias de autores.....	12
1.3. ESTADO DEL ARTE	12
1.3.1. Investigación Internacional	12
1.3.1.1. Antecedente de la empresa Tecnalía	13
1.3.1.2. El último abrazo	14
1.3.1.3. Los beneficios del aprendizaje inmersivo	14
1.3.2. Investigación Nacional.....	15
1.4. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	16
1.5. SOLUCIÓN PROPUESTA	17
1.6. PARQUE EÓLICO VALLE DE LOS VIENTOS	17
CAPÍTULO 2: DEFINICIÓN DEL ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLOS PARA EL AEROGENERADOR	19
2. DEFINICIÓN DEL ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLOS PARA EL AEROGENERADOR	20
2.0.1. Modelo de gestión de mantenimiento (MGM).....	20
2.1. FLUJOGRAMA.....	22
2.2. DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL	23
2.2.1. Componentes mecánicos de la turbina eólica Vestas V100 – 2.0 [MW]	23
2.3. SELECCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO.....	33
2.3.1. Modelo de criticidad (MCCR): Matriz de criticidad cualitativa de riesgo.....	34

2.4.	DESARROLLO DE AMEF Y CRITICIDAD APLICADO AL SUBSISTEMA DE PALAS	38
2.4.1.	Definición de los modos de fallos y análisis de criticidad	39
2.4.2.	Causas probables	40
2.4.3.	Planes de acción	42
2.4.4.	Definición de estrategias de mantenimiento	43
2.4.5.	Integración de la RVI en el AMEF y Plan de Acción al caso de estudio	46
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA REALIDAD VIRTUAL INMERSIVA		47
3.	DESARROLLO DE LA REALIDAD VIRTUAL INMERSIVA	48
3.0.1.	Requerimientos funcionales	48
3.0.2.	Requerimientos Técnicos	49
3.2.	DISEÑO DEL APLICATIVO PARCIAL	52
3.2.1.	3D Sample Scene (URP)	52
3.2.1.	XR Interaction Toolkit	54
3.2.1.	OpenXR Plugin	55
3.2.1.	Arquitectura del sistema	57
3.2.2.	Elementos de mantenimiento con VR	59
3.3.	IMPLEMENTACIÓN	61
3.3.1.	Escena de inicio de interfaz gráfica (plataforma de PC)	62
3.3.1.	Escena de inicio de la interfaz gráfica (plataforma de VRI)	63
3.3.2.	Escena de AMEF al subsistema de palas (plataforma PC)	64
3.3.4.	Escena de AMEF al subsistema de palas (plataforma VRI)	65
3.3.4.	Análisis del prototipo parcial	69
BIBLIOGRAFIA		75
ANEXO A		77
ANEXO B		78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Línea de tiempo de la Revolución Industrial	1
Figura 1-2: La información fluye	2
Figura 1-3: Imágenes de las gafas	9
Figura 1-4: Imágenes de los Joystick	10
Figura 1-5: Imágenes del gemelo digital de una turbina eólica.....	13
Figura 1-6: Imágenes del accidente	14
Figura 1-7: Imágenes descriptiva del sistema Strivr	15
Figura 1-8: Imágenes de la plataforma minera de MINVERSO	16
Figura 1-9: Imágenes del Parque Eólico Valle de los Vientos	18
Figura 2-1: Modelo del proceso de gestión del mantenimiento (MGM).....	21
Figura 2-2: Modelo de Flujograma.....	22
Figura 2-3: Esquema de ubicación del subsistema de Palas.....	39
Figura 3-1: Cable Oculus Link	51
Figura 3-2: Proceso de descarga de 3D Sample Scene (URP)	52
Figura 3-3: Escena del nuevo proyecto Setup	54
Figura 3-4: Proceso de descarga del paquete XR Interacción Toolkit.....	55
Figura 3-5: Proceso de descarga del paquete OpenXR Plugin.....	56
Figura 3-6: Arquitectura del sistema	57
Figura 3-7: Representación de la escena 1	58
Figura 3-8: Representación de la escena 2	59
Figura 3-9: Turbina eólica de modelo Vestas.....	60
Figura 3-10: Turbina eólica de modelo Vestas V150 – 4.2 [MW].....	61
Figura 3-11: Escena de inicio de interfaz gráfica (plataforma PC)	62
Figura 3-12: Escena de inicio de interfaz gráfica (plataforma VRI)	63
Figura 3-13: Escena de inicio de interfaz gráfica (plataforma VRI)	64
Figura 3-14: Escena 2 de simulador de fallas del aerogenerador	65
Figura 3-15: Escena AMEF, pestañas 1 y 2 en RVI.....	66
Figura 3-16: Escena AMEF, pestañas 3, 4 y 5 en RVI.....	67

Figura 3-17: Escena AMEF, pestañas 6 en RVI.....	67
Figura 3-18: Escena AMEF, pestañas 7 en RVI.....	68
Figura 3-19: Utilización del aplicativo parcial.....	69
Figura 3-20: Escena de indicadores.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Requerimientos técnicos de las Gafas Oculus Quest 2.....	9
Tabla 2-1: Especificaciones técnicas del convertidor.....	24
Tabla 2-2: Especificaciones técnicas del sistema Hidráulico.....	24
Tabla 2-3: Especificaciones técnicas de los Bujes.....	25
Tabla 2-4: Especificaciones técnicas de la Torre.....	25
Tabla 2-5: Especificaciones técnicas del Transformador.....	26
Tabla 2-6: Especificaciones técnicas del Generador.....	27
Tabla 2-7: Especificaciones técnicas del sistema Yaw.....	28
Tabla 2-8: Especificaciones técnicas Transmisión.....	29
Tabla 2-9: Especificaciones técnicas Conjunto de eje principal.....	29
Tabla 2-10: Especificaciones técnicas del sistema Pith.....	30
Tabla 2-11: Especificaciones técnicas de las Palas.....	31
Tabla 2-12: Especificaciones técnicas del Rotor.....	32
Tabla 2-13: Matriz de Criticidad Cualitativa de Riesgo (MCCR).....	36
Tabla 2-14: Cálculo de criticidad de los Subsistemas.....	37
Tabla 2-15: Cálculo de criticidad de los Modos de fallas del subsistema de las palas.....	40
Tabla 2-16: Cálculo de análisis de modos y efectos (AMEF).....	41
Tabla 2-17: Plan de acción a los modos de fallos físicos del subsistema de palas.....	45
Tabla 3-1: Requerimientos técnicos del computador.....	49
Tabla 3-2: Requerimientos de la GPU (NVIDIA) compatibles con Link.....	50
Tabla 3-3: Requerimientos de la GPU (AMD) compatibles con Link.....	50

Tabla 3-4: Representación de las Fortalezas y Amenazas del Prototipo parcial	72
Tabla 3-6: Costos asociados a la mano de obra.....	77
Tabla 3-7: Costos asociados a la implementación parcial de Realidad Virtual.....	77
Tabla 3-8: Costos asociados a la mano de obra.....	78
Tabla 3-9: Costos asociados a una estimación del proyecto de Realidad Virtual terminado	79

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

A continuación, se expondrán ejemplos de las Siglas y Símbolos que pueden estar incluidos en el Trabajo de Titulación. Estos deben estar normados e indicadores en orden alfabético. Se reitera, que todas Siglas y Símbolos, Indicados en el escrito, deben señalarse en este apartado.

SIGLA

A	:	Disponibilidad.
AMEF	:	Análisis de modos y efectos de fallos.
C	:	Consecuencias de los fallos.
CDF	:	Costos directos de fallos.
CIF	:	Coste por indisponibilidad por fallos.
IP	:	Impacto en producción.
FF	:	Frecuencia de fallas.
M	:	Mantenibilidad.
MCCR	:	Matriz de criticidad cualitativa de riesgo.
MGM	:	Modelo de gestión de mantenimiento.
MTTF	:	Tiempo medio hasta la falla.
MTTR	:	Tiempo medio para reparación.
R	:	Confiabilidad.
RCM	:	Mantenimiento centrado en la confiabilidad.

RV	:	Realidad virtual.
RVI	:	Realidad virtual Inmersiva.
SHA	:	Impacto en seguridad y medio ambiente.
TFS	:	Tiempo fuera de servicios.
TO	:	Tiempo operativo.

SIMBOLOGÍA *(De acuerdo con lo estipulado por el Sistema Internacional de Unidades [SI]).*

A	:	Ampere.
°C	:	Celsius.
g	:	Gramos.
Gb	:	Gigabyte.
GWh	:	Gigavatio hora.
hrs	:	Horas.
hrs/año	:	Horas por año.
Hz	:	Hertz.
kg	:	Kilogramo.
km	:	Kilómetro.
kV	:	Kilovoltio.
kVA	:	Kilovoltamperio.
kW	:	Kilovatio.
l/min	:	Litros por minutos.
m	:	Metros.
m ²	:	Metrocuadrado.
mm	:	Milímetros.
m/s	:	Metro por segundo.
mm/s	:	Milímetros por segundo.
MW	:	Megavatio.
RPM	:	Revolución por minuto.
und	:	Unidad.

V	:	Voltio.
VAC	:	Voltios de corriente alterna.
bar	:	Bar (No es parte del Sistema Internacional de Unidades).

TERMINOLOGIA

Frecuencias de fallo (FF): Se refiere a la cantidad de veces que un equipo o sistema experimenta una falla o avería en un período de tiempo determinado.

Tiempo medio para reparación (MTTR): Es una medida que indica el tiempo promedio un sistema o equipo tarda en ser reparado después de su falla.

Tiempo medio hasta la falla (MTTF): Es una medida que indica el tiempo promedio esperado hasta que el sistema o equipos falle.

Confiabilidad (R): Probabilidad de que un sistema o equipo esté operativo durante un tiempo y uso específicos.

Mantenibilidad (M): Probabilidad de que un equipo o sistema pueda ser restablecido en condiciones de operación dentro de un período de tiempo establecido.

Disponibilidad (A): Duración de tiempo que una planta o equipo requiere para operar.

Coste por indisponibilidad por fallos (CIF): Se refiere al coste asociado con la falta de disponibilidad de un sistema, equipo o maquina debido a fallos.

Tiempo operativo (TO): Período durante el cual un sistema o equipo esta efectivamente em funcionamiento y realiza sus tareas designadas.

Tiempo fuera de servicio (TFS): Período durante el cual un sistema o equipo no está disponible para realizar sus funciones habituales debido al mantenimiento, reparaciones o averías.

Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM): Estrategia de mantenimiento a nivel corporativo diseñado para optimizar los programas de mantenimiento mediante el establecimiento de las funciones más críticas de una empresa.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día gran parte de la tecnología que utilizamos son la evolución de las primeras máquinas confeccionadas en pleno apogeo de la primera revolución industrial, este periodo modificó el destino de la humanidad en pleno siglo XVIII. En su inicio, se crearon numerosas máquinas con el fin de mejorar los sistemas de producción, entregando así una mejor optimización en los procesos de manufacturación.

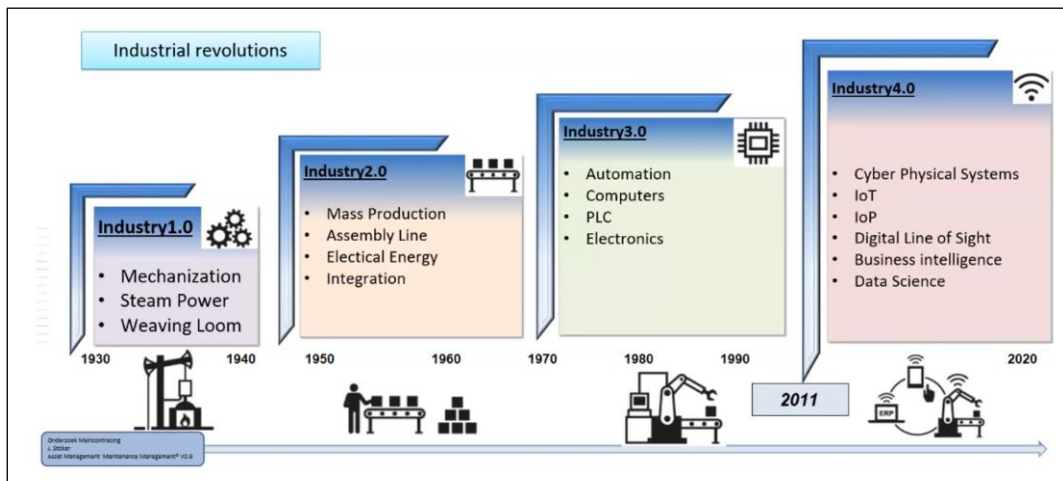


Figura 1-1: Línea de tiempo de la Revolución Industrial

Fuente: Presentación del Profesor Diego Galar

Las tres primeras revoluciones industriales fueron marcadas por hitos tecnológicos observados en la (Figura 1-1). No obstante, la industrial 4.0 es conocida por la democratización de los servicios como la adquisición de datos, equipos electrónicos, sensores, comunicación, analítica, etc. Por medio del abaratamiento de los costos de estos servicios, nos lleva a una evolución en el campo de mantenimiento extendiéndose así a las industrias, dando acceso a las tecnologías que nos ayudaran a tener libre acceso a los datos obtenidos por los servicios previamente nombrados. Estos tipos de servicios pueden ser utilizados para desarrollar modelos digitales que nos ayudaran a conocer las analíticas de los activos, ver (Figura 1-2), (Galar, 2024).

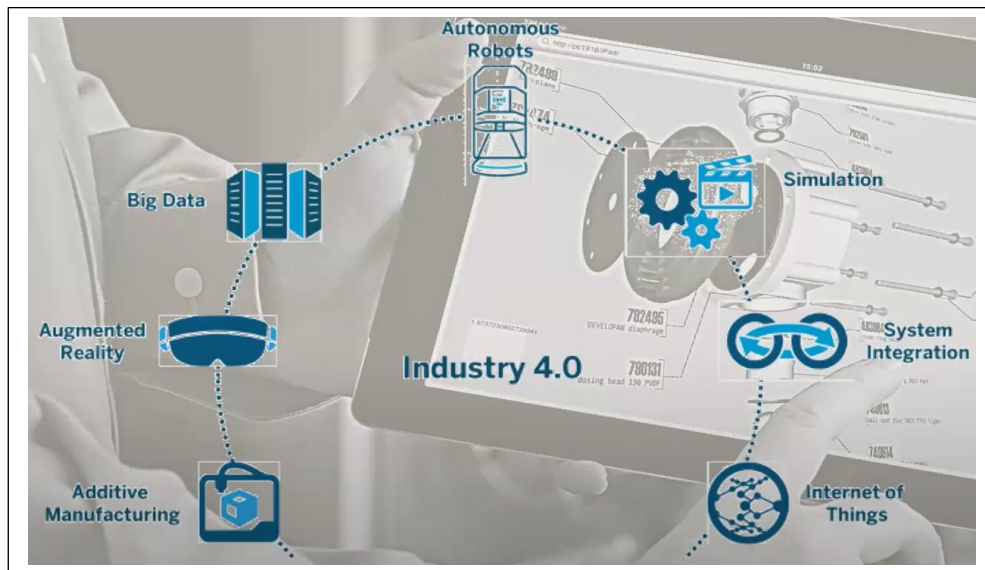


Figura 1-2: La información fluye

Fuente: Presentación del Profesor Diego Galar

En el ámbito de las energías renovables, la integración con industria 4.0 ha sido clave para mejorar los procesos de supervisión y mantenimientos en los activos, lo que se traduce en una mayor confiabilidad y vida útil de los equipos. La adquisición de datos es fundamental para su utilización en diversos escenarios, por ejemplo, mediante simuladores de realidad virtual o aumentada, es posible recrear escenarios de trabajo con el fin de capacitar a los operadores en tareas y prácticas de mantenimiento, lo que les permite identificar problemas potenciales y familiarizarse con los procedimientos correspondientes a dichas tareas. (Roca, 2017).

En este contexto, el presente trabajo tiene la intención de desarrollar un modelo de aprendizaje inmersivo por medio de la realidad virtual (RV), utilizando una herramienta metodológica referente a la gestión de activos a un equipo de aerogenerador eólico, con el fin de proporcionar una herramienta de adiestramiento para capacitar a futuros técnicos en mantenimiento o áreas afines. El entorno virtual estará basado en el parque eólico valles de los vientos, Sector de Calama, III región, Chile.

Para lograr esto, el trabajo se organizará en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Marco Teórico, este capítulo estará enfocado en el primer punto del objetivo específico.

Capítulo II: Definición del análisis de modos y efectos de fallos para el aerogenerador, este capítulo estará enfocado en el segundo punto del objetivo específico.

Capítulo III: Desarrollo de la realidad virtual inmersiva, este capítulo estará enfocado en el tercer punto del objetivo específico.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de aprendizaje inmersivo con un simulador de realidad virtual, utilizando la técnica de análisis de modo y efectos de fallos (AMEF) en un aerogenerador. Para la creación de una herramienta de capacitación para el entrenamiento de los futuros técnicos en mantenimiento, mejorando la eficiencia de los procesos para prevenir errores humanos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recopilar información detallada sobre el aprendizaje inmersivo en la capacitación para definir las herramientas de realidad virtual (RV) a utilizar en los procesos de mantenimiento.
- Definir los requerimientos técnicos para desarrollar la metodología de análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) en un proceso de realidad virtual inmersiva (RVI) para el adiestramiento al personal de mantenimiento.

- Desarrollar un prototipo de realidad virtual inmersiva (RVI) para simular el proceso de análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) de un aerogenerador. Luego, se presentará una aplicación parcial de la herramienta en un subsistema crítico del aerogenerador.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

El aprendizaje inmersivo es una metodología que se utiliza en diversas áreas laborales como una herramienta de aprendizaje práctico, con el objetivo de reducir los impactos económicos y ambientales. Esta metodología se basa en la creación de una plataforma virtual que se integra con el mundo real, permitiendo a los usuarios interactuar con elementos físicos y simular experiencias del mundo real (Muñoz, 2021).

Este entorno virtual, también conocido como mundo de fantasía, se crea mediante un motor gráfico que puede generar y operar contenidos interactivos en 3D en tiempo real (RT3D) a través de Computador. Además, se puede distinguir tres niveles de inmersión según el grado de interacción:

- Aprendizaje de baja inmersión: En este nivel, se presenta una realidad virtual en tres dimensiones, a través de un motor gráfico de Multiplataforma en un ordenador. La interacción se realiza mediante dispositivos como teclado, mouse o un joystick de videojuego (Muñoz, 2021).
- Aprendizaje semi inmersivo: Este nivel permite transportar al usuario a un entorno virtual utilizando gafas de realidad virtual en 3D. Este sistema rodea al usuario y utiliza seguimiento de movimientos de cabeza para una experiencia más inmersiva. El usuario puede visualizar e interactuar con los elementos proyectados (Muñoz, 2021).
- Aprendizaje de alta inmersión: En este nivel, el usuario puede interactuar con el entorno virtual mediante dispositivos especiales, lo que permite una interacción más completa. Estos dispositivos pueden incluir sensores externos que mejoran la experiencia de interacción (Muñoz, 2021).

1.1. REALIDAD VIRTUAL EN LA CAPACITACIÓN

Este tipo de tecnología está siendo cada vez más considerada y utilizada en las industrias debido a su flexibilidad para reducir costos, proporcionar un ambiente de trabajo más seguro y permitir el traslado de personal capacitado a diferentes escenarios sin necesidad de moverlo físicamente de su lugar.

Es importante mencionar que existen dos clases de interacción con esta tecnología:

- 3DoF (three degree of freedom, por sus siglas en inglés): Este formato nos permite visualizar hacia cualquier lado con el visor de realidad virtual, y también interactuar con los objetos a través de un control de movimiento (Inmersys, 2023).
- 6DoF (six degree of freedom, por sus siglas en inglés): Además de contar con las características del formato 3DoF, permite el movimiento dentro del escenario virtual (Inmersys, 2023).

1.1.1. Descripción de los tipos de adiestramiento

La realidad virtual inmersiva ofrece una gama de posibilidades educativas y tipos de enseñanzas. Algunos ejemplos Incluyen:

- Capacitación por escenario: Este tipo de adiestramiento permite sumergirse en situaciones reales a las que el trabajador se enfrenta en su día a día laboral (Inmersys, 2023).
- Habilidades técnicas: Consiste en recrear las actividades diarias del trabajador, determinando su papel en el campo laboral (Inmersys, 2023).

- Tareas de pasos múltiples: Orientado específicamente al área de mantenimiento, este tipo de adiestramiento brinda condiciones de revisión de las etapas de un proceso. (Inmersys, 2023).
- Onboarding: Está herramienta muestra al trabajador en el área donde se desarrollará su trabajo diariamente, así como a sus compañeros de trabajo (Inmersys, 2023).
- Simulación: Se utiliza en áreas de alto riesgo, como operaciones militares, policiales e industriales. El objetivo es asemejarse lo más posible a la realidad, incluyendo las consecuencias de llevar a cabo un procedimiento incorrecto (Inmersys, 2023).

1.1.2. Dispositivos de realidad virtual

En el mercado existen diversos dispositivos que permiten lograr una experiencia inmersiva en la realidad virtual, entre ellos se encuentra las gafas Oculus Quest, las cuales ofrecen diferentes diseños y características. Sin embargo, para este caso de estudio se utilizará las gafas Oculus Quest 2.

Este dispositivo es fabricado por la empresa Oculus, una división de Facebook. Oculus se especializa en el desarrollo de tecnología de realidad virtual y ha lanzado múltiples generaciones de auriculares de realidad virtual, incluyendo el modelo que utilizaremos. A continuación, se presentan las características técnicas del Oculus Quest 2, ver (Tabla 1-1):

Requerimientos Técnicos de los Gafas Oculus Quest 2	
Descripción	Características
Peso	503 [g]
Tipo de panel	LCD
Resolución	1.920 x 1.832 por ojo
Frecuencia	90 [Hz]-72 [Hz]
Procesador	Snapdragon XR2
Conectividad inalámbrica	WIFI 6 Bluetooth 5.1
Entrada	USB Tipo C
Sonido	3D
Tracking	Cámaras internas
Elementos	Visor
	2 x mandos
	2 x Pilas AA
	1 x Cargador
	1 x Adaptador

Tabla 1-1: Requerimientos técnicos de las Gafas Oculus Quest 2

Fuente: Elaboración propia

Las gafas, ver (Figura 1-3). Funcionan a una frecuencia de 120 [Hz], lo que proporciona una navegación más fluida y una experiencia más cómoda. Además, su configuración es sencilla y fácil de usar.



Figura 1-3: Imágenes de las gafas

Fuente: Pagina Web de GMSPRO

El dispositivo está equipado con controladores o mandos dinámicos, ver (Figura 1-4). Ofrecen movimientos precisos y naturales, brindando una experiencia increíblemente inmersiva.



Figura 1-4: Imágenes de los Joystick

Fuente: Pagina Web de GMSPRO

1.2. METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO EN UN ENTORNO REALIDAD VIRTUAL

La implementación de herramientas de gestión de activos en el área de mantenimiento en un entorno de realidad virtual ofrece numerosos beneficios, ya que permite simular escenarios de mantenimiento de manera interactiva y práctica. A continuación, se explicarán algunas maneras en las que las metodologías de mantenimiento pueden ser integradas en la realidad virtual:

- **Formación y Entrenamiento:** La realidad virtual proporciona un entorno seguro y controlado para entrenar al personal en procedimientos de mantenimiento. Los técnicos pueden practicar la resolución de problemas y la realización de tareas de mantenimiento en un entorno virtual antes de aplicar sus conocimientos en el mundo real.
- **Visualización de procedimientos:** Mediante la realidad virtual, los técnicos pueden visualizar los procedimientos paso a paso, lo que les permite comprender mejor las tareas y los riesgos que conllevan estas al realizar un mantenimiento.
- **Simulación de Escenarios:** La realidad virtual permite simular situaciones de emergencias o complejas, lo que ayudará a preparar al personal para responder de manera eficiente a cada problema.
- **Análisis de datos en tiempo real:** Al integrar datos de mantenimiento en una aplicativo de realidad virtual, se puede proporcionar información inmediata sobre los equipos y su estado, lo que facilita la toma de decisiones.

1.2.1. Referencias de autores

Según Pablo Zúñiga, Gerente de Servicios Remotos METSO. *“La realidad virtual (VR por sus siglas en inglés), es hoy por hoy, una nueva forma de acercar los servicios de los proveedores a las necesidades de las operaciones mineras. El uso de una realidad en 3D a escala y renderizada de parte o la totalidad de una plataforma, permite alcanzar una mayor productividad en el desarrollo de las actividades, la familiarización inmediata con tareas reales, la sinergia en la creación, diseño y planificación, la mejora en el entendimiento de las condiciones inseguras, una aceleración en los tiempos de aprendizaje en capacitaciones, entre otros beneficios”* (Zúñiga, 2023).

Por otro lado, Inmaculada Aznar-Díaz y otros investigadores en su revisión bibliográfica, indica que *“la realidad virtual está ganando cada vez más protagonismo en las aulas educativas y que el interés en este tema está en constante aumento. La realidad virtual está proporcionando nuevas herramientas de aprendizaje y fomentando la colaboración entre los estudiantes”* (Inmaculada, 2018).

1.3. ESTADO DEL ARTE

Se procederá a analizar el estado del arte relacionado con el caso de estudio a desarrollar, este análisis incluirá investigaciones internacionales y naciones que servirán como antecedentes para considerarlos como variables en las problemáticas a desarrollar.

1.3.1. Investigación Internacional

La realidad virtual en entornos inmersivos se ha utilizado en diversas áreas, incluida la capacitación de operadores de turbina eólicas. A continuación, se presentarán antecedentes relevantes para este caso de estudio.

1.3.1.1. Antecedente de la empresa Tecnalía

Tecnalia es una empresa líder en el desarrollo e investigación de energías renovables aplicadas en las turbinas eólicas. Su sede se encuentra en España y es reconocida internacionalmente por su experiencia en diferentes ámbitos.

Una de las contribuciones destacadas de Tecnalía es el desarrollo de un simulador de realidad virtual para el mantenimiento de turbinas, ver (Figura 1-5). Este simulador permite a los técnicos practicar y entrenar en un entorno virtual similar a la realidad, con el objetivo de reducir accidentes laborales, mejorar la eficiencia y seguridad en el mantenimiento.

El simulador ofrece una experiencia inmersiva donde los técnicos pueden realizar tareas de mantenimiento y aprender sobre los análisis de modos y efectos de fallos (AMEF), que son esenciales para el entrenamiento, lo que contribuye a reducir los riesgos asociados con el mantenimiento de las turbinas.

En resumen, el simulador desarrollado por Tecnalía es una herramienta vanguardista que utiliza la realidad virtual para mejorar el entrenamiento de los técnicos en el mantenimiento de turbinas eólicas, con un enfoque en la seguridad y eficiencia de los activos (Tecnalia, 2023).

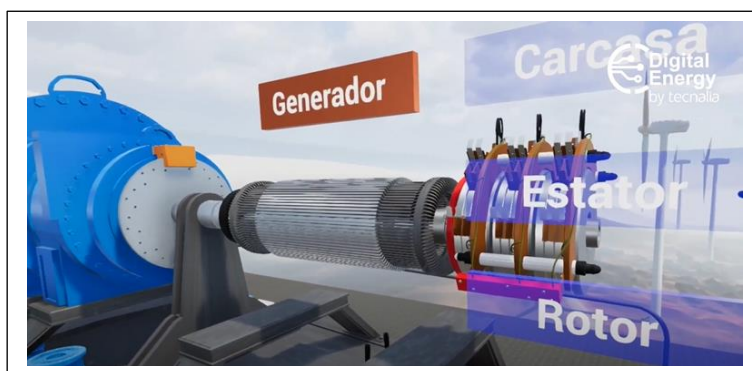


Figura 1-5: Imágenes del gemelo digital de una turbina eólica

Fuente: Pagina Web de Tecnalía

1.3.1.2. El último abrazo

En el año 2013 dos jóvenes perdieron la vida mientras trabajaban como técnicos en las turbinas eólicas ubicadas en la ciudad de Oltgensplaat, provincia holandesa de Holanda meridional. El día 29 de octubre, recibieron un reporte de un fallo en una de las turbinas eólicas de modelo Vestas, ver (Figura 1-6). Ambos técnicos tuvieron que subir a una altura de 70 metros para localizar y reparar la avería. Desafortunadamente, se produjo un cortocircuito en el interior del molino, lo que provocó un incendio que se propagó rápidamente, resultando en el trágico fallecimiento de los dos trabajadores (Paz, 2023).



Figura 1-6: Imágenes del accidente

Fuente: Pagina Web de Maisoncapitol

1.3.1.3. Los beneficios del aprendizaje inmersivo

Según los estudios realizados por la empresa de capacitación estadounidense Strivr, se ha demostrado que el uso de la realidad virtual aumenta los niveles de aprendizaje en un 75%, en comparación al 10% a través de la lectura, ver (Figura 1-7). Además, se ha observado una reducción del 40% en los tiempos de capacitación y un aumento del 10% en la satisfacción de los usuarios. Los empleados que han pasado por el proceso de aprendizaje inmersivo se sienten un 100% más preparados para sus trabajos (Entel, 2022).

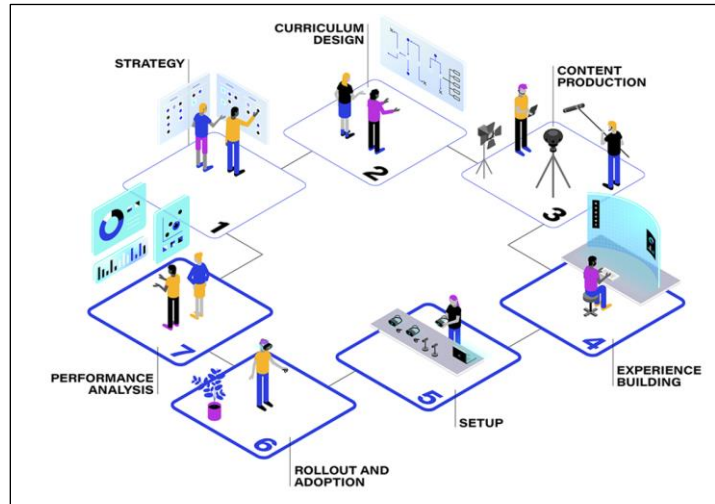


Figura 1-7: Imágenes descriptiva del sistema Strivr
 Fuente: Pagina Web de Strivr

1.3.2. Investigación Nacional

La empresa chilena MINVERSO se dedica al desarrollo tecnológico en el ámbito minero, ver (Figura 1-8). Es conocida por crear el primer “metaverso minero” del mundo. Su objetivo principal es fomentar la eficiencia, productividad y seguridad en la industria minera.

La empresa MINVERSO utiliza software para BIM (Building Información Modeling), IoT (Internet of Things), todo esto para crear el ecosistema minero de interacción y colaboración. Esto busca mejorar la comunicación y la toma de decisiones en la industria y reducir los riesgos (Zuñiga, 2023).



Figura 1-8: Imágenes de la plataforma minera de MINVERSO

Fuente: Pagina Web de MINVERSO

1.4. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En la lucha contra el cambio climático, la energía eólica juega un papel crucial al sustituir las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles. Sin embargo, dado que esta industria aún se encuentra en constante desarrollo y evolución, los accidentes y eventos imprevistos son situaciones recurrentes. La falta de capacitación adecuada aumenta la probabilidad de que ocurra un accidente laboral. En la actualidad, no existe de forma automatizada una simulación que permita evaluar aspectos operacionales relacionado a la gestión de activos. Específicamente para el área de mantenimiento, se pretende utilizar herramientas de la Era digital para desarrollar un entorno de adiestramiento que permita mejorar el desempeño técnico del mantenimiento a través de los artefactos de realidad virtual (RV).

Inicialmente, el enfoque está en el sector de las energías renovables, pero se reconoce que este es un problema común en varios procesos industriales, como la minería, la celulosa, la refinería, entre otras. Muchas de las decisiones que se toman en las operaciones y en el

mantenimiento en estas industrias terminan generando fallos catastróficos que afectan la seguridad. Por lo tanto, mediante este trabajo, se estudia la idea de apoyarse de estas herramientas de la industria 4.0 para mejorar el proceso de mantenimiento.

1.5. SOLUCIÓN PROPUESTA

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, este estudio se centrará en el desarrollo de un modelo de aprendizaje inmersivo utilizando un prototipo de simulador de realidad virtual basado en el análisis de modo y efectos de fallos (AMEF) aplicado a una turbina eólica del modelo Vestas V100-2.0 [MW], ubicado en el parque valle de los vientos, sector de Calama, Chile. El objetivo principal de este enfoque es proporcionar una herramienta de capacitación que permita la formación de futuros técnicos de mantenimiento, mejorando así la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de estas instalaciones, contribuyendo a la prevención de accidentes y errores humanos.

1.6. PARQUE EÓLICO VALLE DE LOS VIENTOS

A lo largo del país, actualmente hay 44 parques eólicos en funcionamiento y otros 12 en procesos de construcción. Esta iniciativa se inició en el año 2001 con la inauguración del primer parque, llamado Alto Baguales, cerca de Coyhaique.

El parque eólico que se analizará en este estudio se llama “Valle de los vientos” y está ubicado en la provincia del Loa, en el sector de Calama, ver (Figura 1-6). La construcción del parque comenzó en el año 2012 y se inauguró un año después, en año 2013 (Enel, 2013).

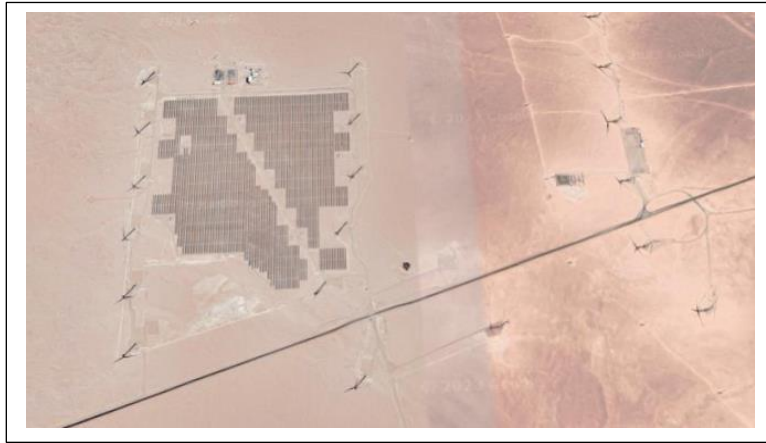


Figura 1-9: Imágenes del Parque Eólico Valle de los Vientos

Fuente: Google Earth Studio

En el próximo Capítulo, se procederá a definir los requerimientos técnicos del caso de estudio utilizando herramientas de gestión de riesgos. El objetivo será determinar los subsistemas más críticos del aerogenerador.

CAPÍTULO 2: DEFINICIÓN DEL ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLOS PARA EL AEROGENERADOR

2. DEFINICIÓN DEL ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLOS PARA EL AEROGENERADOR

El análisis de modo y efectos de fallos (AMEF), también conocida como FMEA (Failure Mode Effect Analysis) en inglés, se guiará por la norma UNE 60812 (UNE-EN, 2008). Esta norma define y detalla los pasos necesarios para un correcto desarrollo y es comúnmente utilizado para prevenir posibles fallas en sistema o componentes. En el caso específico del aerogenerador, se empleará el AMEF para analizar los modos de falla y los posibles efectos que podrían afectar el funcionamiento del equipo.

Para llevar a cabo esta tarea de manera efectiva, se implementará una estructura de gestión de mantenimiento que permitirá planificar, organizar y controlar todas las actividades relacionadas con el mantenimiento del aerogenerador.

2.0.1. Modelo de gestión de mantenimiento (MGM)

Para este caso de estudio, se utilizará el modelo de gestión de mantenimiento (MGM) que consta de 8 fases, ver (Figura 2-1). El objetivo principal es establecer una serie de componentes que guiarán el problema hacia una técnica de jerarquización y criticidad. En este sentido, se utilizará la fase 2 para llevar a cabo el matriz de criticidad cualitativa de riesgo (MCCR), que consiste en la jerarquización de equipos según la importancia de su función, y la fase 4 para realizar el análisis de modos y efectos de fallos (AMEF), que implica diseñar planes de mantenimientos preventivo y determinar los recursos necesarios (Parra, 2021).

Una de las ventajas de las técnicas de análisis de criticidad es que permiten identificar y jerarquizar los activos en función de su nivel de importancia, lo cual ayuda a evaluar si vale la pena asignar recursos a su mantenimiento. Además, estas técnicas también permiten

determinar la importancia y las posibles consecuencias de las fallas que puedan ocurrir en los sistemas de producción. Todo esto se realiza en el contexto operacional específico en el que se encuentra el activo.



Figura 2-1: Modelo del proceso de gestión del mantenimiento (MGM)

Fuente: Paper básico de criticidad Ingeman (2023)

La fase 2 del proceso nos permitirá desarrollar la matriz de criticidad cualitativa de riesgo, la cual se enfoca en los subsistemas y modos de fallas. Por otro lado, la fase 4 nos ayudará a llevar a cabo el análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) específicamente para el aerogenerador.

2.1. FLUJOGRAMA

Se desarrollará un flujograma, ver (Figura 2-2). Capaz de identificar las etapas de los procedimientos para facilitar la confección del análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) y así determinar la estrategia de mantenimiento, para luego, integrar los procesos a la plataforma de realidad virtual inmersiva.

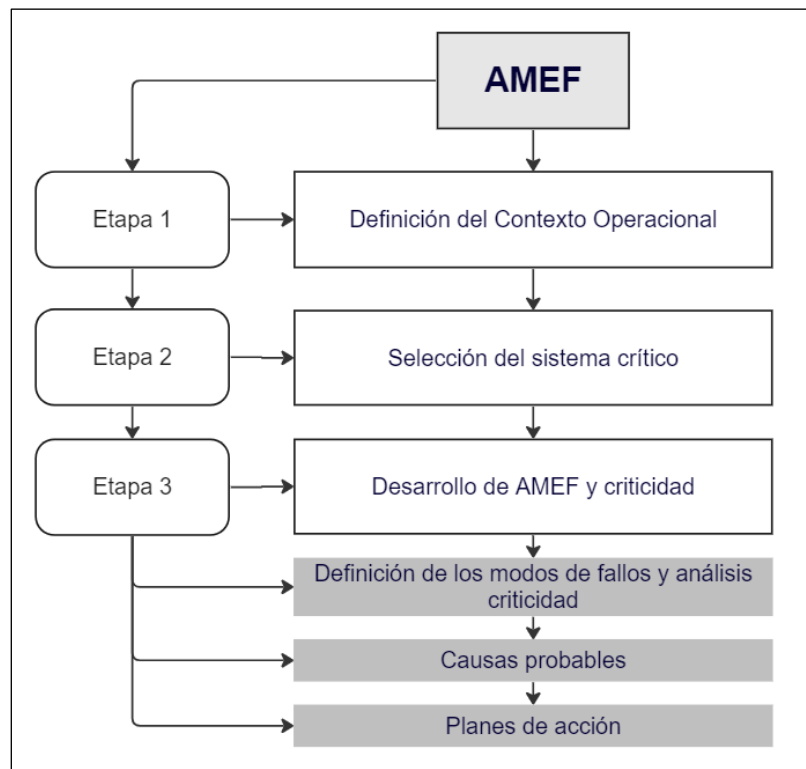


Figura 2-2: Modelo de Flujo de AMEF

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se abordará cada una de las etapas señaladas en el flujograma. En primer lugar, se procederá a definir el contexto operacional de la turbina eólica V100-2.0 [MW] del parque eólico valles de los vientos.

2.2. DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL

El activo físico debe proveer de energía eléctrica al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). El parque cuenta con una capacidad instalada de 90 [MW], mediante aerogeneradores de 2 [MW] cada uno, lo que permite generar más de 200 [GWh] de energía renovable al año. (Enel, Guía Chile energía, 2018)

2.2.1. Componentes mecánicos de la turbina eólica Vestas V100 – 2.0 [MW]

La turbina eólica del modelo V100 fabricada por Vestas, una empresa danesa especialista en energía eólica desde su fundación en 1945. Vestas es reconocida a nivel mundial y cuenta con más de 38.000 aerogeneradores instalados en diversos lugares del mundo.

A continuación, se detallarán las especificaciones técnicas de los componentes de la turbina eólica modelo V100 (Vestas, 2013).

- **Convertidor de frecuencia:** Tiene la función de controlar la conversión de energía en el generador, ver (Tabla 2-1). Su tarea principal es alimenta la energía desde la red al rotor del generador a una velocidad de subsincronización (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas del Convertidor de Frecuencia	
Descripción	Características
deslizamiento nominal	12%
RPM nominal	1680 [RPM]
Potencia nominal del rotor (@rated slip)	193 [kW]
Potencia nominal de la red (@rated slip)	232 A
Corriente nominal del rotor	573 A

Tabla 2-1: Especificaciones técnicas del convertidor

Fuente: General Specification V100

- **Sistema Hidráulico:** La función del sistema hidráulico es controlar la orientación de las palas del aerogenerador, ver (Tabla 2-2). Este sistema está compuesto por un intercambiador de calor de placas que se encuentra ubicado en el Power pack. Además, este sistema se conecta al sistema de refrigeración por agua (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas del Sistema Hidráulico	
Descripción	Características
Intercambiador de calos de placas de aceite de hidráulico	
Flujo de aceite nominal	40 [l/min]
Temperatura de entrada de aceite	66° C
Capacidad de enfriamiento	10,28 [kW]
Circuito de agua	
Flujo de agua nominal	App. 45 [l/min] (50% glycol)
Temperatura de entrada de agua	Max. 54 °C
Capacidad de enfriamiento	10,28 [kW]

Tabla 2-2: Especificaciones técnicas del sistema Hidráulico

Fuente: General Specification V100

- **Bujes:** Los bujes desempeñan un papel crucial en el aislamiento y sellado de la carcasa del tanque de aceite del transformador, ver (Tabla 2-3), (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas de los Bujes	
Descripción	Características
Voltaje nominal	1-1100 [kV]
Corriente nominal	10-40000A

Tabla 2-3: Especificaciones técnicas de los Bujes

Fuente: General Specification V100

- Torre: Las torres están disponible en diferentes tamaños estandarizados y se componen de una conexión de brida. Además, se utilizan imanes para proporcionar soporte a las cargas en dirección horizontal, cómo plataformas, escaleras y otros elementos similares, ver (Tabla 2-4). Por otro lado, las partes internas de la torre se apoyan verticalmente, es decir, en dirección gravitacional, mediante de las conexiones mecánicas (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicos de la Torre	
Descripción	Características
Tipo	Cónica tubular
Altura	80 [m] / 95 [m]
Material	Acero estructural S355 según EN 10024. Acero estructural A709 según ASTM
Peso	80 [m] IEC S 160 toneladas métricas. 95 [m] IEC S 205 toneladas métricas.

Tabla 2-4: Especificaciones técnicas de la Torre

Fuente: General Specification V100

- Transformador: El transformador se encuentra ubicado en una habitación dentro de la góndola, y cuenta con protección contra sobretensiones y pararrayos cómo medidas de seguridad adicionales. Es importante destacar que este transformador es de tipo seco trifásico de dos devanados, ver (Tabla 2-5).

Los devanados de baja tensión del transformador tienen una tensión nominal de 690 [V] y una toma de 480 [V]. Estos devanados están configurados como sistemas TN, lo que significa que la punta de estrella está conectado a tierra, proporcionando un sistema de seguridad adicional (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas del Transformador	
Descripción	Características
Tipo	Resina fundida de tipo seco
Voltaje primario	6-35 [kV]
Potencia aparente normal	2100 [KVA]
Voltaje secundario 1	690 [V]
Potencia normal 1 a 690 [V]	1900 [KVA]
Voltaje secundario 2	480 [V]
Potencia normal 2 a 480 [V]	200 [KVA]
Grupo de vectores	Dyn5 (Opción YNyn0)
Frecuencia	50/60 [Hz]
HV-Grifos	$\pm 2 \times 2,5$ % Offload
Clase de aislamiento	F
Clase climática	C2
Clase ambiental	E2
Clase de comportamiento ante el fuego	F1

Tabla 2-5: Especificaciones técnicas del Transformador

Fuente: General Specification V100

- **Generador:** El generador utilizado en esta turbina eólica es un generador asíncrono trifásico de cuatro polos con un rotor bobinado. Este rotor está conectado al Vestas Converter System (VCS) mediante un sistema de anillos deslizantes. Es importante destacar que el generador es de tipo aire-aire, lo que significa que utiliza un sistema de circuitos internos y externos para su refrigeración, ver (Tabla 2-6).

El sistema de refrigeración del generador aprovecha el aire de la góndola para su enfriamiento, mientras que el aire caliente generado internamente se expulsa por la parte posterior. Esta configuración garantiza un funcionamiento eficiente y adecuado para la disipación del calor (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas del Generador	
Descripción	Características
Tipo	Asincrónico con rotor bobinado, anillos colectores, VCS
Potencia normal	1,8 [MW]
Potencia aparente normal	2,0 [MVA] ($\text{Cos}\phi = 0,9$)
Frecuencia	50 [Hz]
voltaje del generador	690 [VAC]
voltaje del convector	480 [VAC]
N° de polos	4
Tipo de bobinado (Estator / Rotor)	Random / Form
Conexión de bobinado, estator	Star / Delta
Eficiencia normal (solo generador)	> 97 %
Factor de potencia (Cos)	0,90 ind - 0,95 cap
Exceso de límite de la velocidad según a IEC (2 min.)	2900 [RPM]
nivel de vibración	< 1,8 [mm/s]
Peso	Aprox. 7500 [kg]
Rodamiento generador - Temperatura	2 Pt100 sensores
Bobinado del estator en generador - Temperatura	3 Pt100 sensores colocados en puntos calientes y 3 (as back - up)

Tabla 2-6: Especificaciones técnicas del Generador

Fuente: General Specification V100

- Sistema Yaw: El sistema Yaw tiene como función principal mantener la turbina eólica orientada en sentido contrario al viento. Este sistema se encuentra instalado en la base de la góndola y está conectado a la torre de la turbina, ver (Tabla 2-7).

El sistema Yaw consta de rodamientos lisos con fricción incorporada, lo que permite que el movimiento sea suave y controlado. Cuando el sistema detecta que la velocidad media del viento es inferior a 3 [m/s], se desactiva automáticamente. Esta función de desactivación automática evita el consumo innecesario de energía y protege el equipo cuando las condiciones del viento no son favorables para la generación de energía (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas del Sistema Yaw	
Descripción	Características
Anillo del sistema	Forjado tratado térmicamente
Tipo de rodamiento	Lisos con fricción incorporada (PETP)
Velocidad Yaw	< 0,5° / segundo
Tipo de engranaje del sistema	Helicoidal combinado sin bloqueo y caja de engranajes planetarios
Motor	Asincrónico de 6 polos y 1,5 [kW]
Número de engranajes	6
Relación del sistema	1.120: 1
Velocidad de rotación eje de salida	1 [RPM]

Tabla 2-7: Especificaciones técnicas del sistema Yaw

Fuente: General Specification V100

- Transmisión: La transmisión en esta turbina eólica se encarga de transferir el par de rotación del rotor al generador. Esta transferencia ocurre desde el eje de alta velocidad al generador, mediante un acoplamiento de compuesto flexible que se encuentra ubicado detrás del freno de disco, ver (Tabla 2-8).

Es importante destacar que el sistema de refrigeración de la caja de cambios está diseñado con dos circuitos de aceite separados. Esto garantiza un adecuado enfriamiento y funcionamiento óptimo de la transmisión. Cada circuito de aceite cumple con una función específica en la refrigeración de la caja de cambios, asegurando así un rendimiento confiable y duradero (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas Transmisión	
Descripción	Características
Tipo de caja de velocidad	Una etapa planetaria más dos etapas helicoidales
Relación	1:113 nominal
Enfriamiento de aceite	Bomba de aceite refrigerante
Calentador de aceite	2 [kW]
Temperatura máxima de aceite	80 °C
Limpieza del aceite (ISO 4406)	/15/12
Lubricación rodamientos	Automática y Continua
Tipo de lubricantes en rodamientos	Grasa

Tabla 2-8: Especificaciones técnicas Transmisión

Fuente: General Specification V100

- Conjunto de eje principal: El conjunto de eje principal es un componente esencial en diversas aplicaciones, como cojinetes, ruedas y engranajes. Se trata de un objeto cilíndrico que cumple múltiples funciones, entre las que se incluyen el soporte de piezas de transmisión, la transmisión de par y la carga de soporte, ver (Tabla 2-9).

Este conjunto de eje principal se encuentra estratégicamente ubicado en el centro de los mecanismos mencionados, y su diseño y resistencia permiten que desempeñe un papel crucial en la transmisión de fuerzas y cargas. Gracias a su forma cilíndrica y su capacidad para soportar diferentes tipos de cargas, contribuye a la estabilidad y eficiencia del sistema en el que se aplica (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas Conjunto de eje principal	
Descripción	Características
Tipo	Forjado, eje de trompeta
Material	42 CrMo4 QT / EN 10083

Tabla 2-9: Especificaciones técnicas Conjunto de eje principal

Fuente: General Specification V100

- Sistema Pitch: El sistema Pitch es un componente esencial en las turbinas eólicas, ya que desempeñan un papel crucial en el control y ajuste del ángulo de inclinación de las palas de rotor, ver (Tabla 2-10).

Este sistema funciona como un mecanismo de frenado que permite disminuir el impacto del viento sobre las palas, lo cual resulta en la desactivación del rotor. Al ajustar el ángulo de inclinación permite proteger la estructura de la turbina y asegurar un funcionamiento seguro y eficiente en diversas circunstancias climáticas (Vestas, 2013).

Detalles Técnicos del sistema Pitch	
Descripción	Características
Tipo de sistema	Hidráulico
Cilindro	Diámetro 125 [mm], Largo 80 [mm], Carrera 760 [mm]
Rango de temperatura	Desde los - 5° a 90°
Cantidad requerida	1 cilindro por pala
Bomba hidráulica	50 [l/min]
Presión de trabajo	200 a 230 [bar]

Tabla 2-10: Especificaciones técnicas del sistema Pith

Fuente: General Specification V100

- Palas: Conocidas como PP (palas pre impregnadas), son componentes fundamentales que contribuyen al funcionamiento y rendimiento del sistema de la turbina eólica, ver (Tabla 2-11).

Estas palas tienen una notable altura de 49 [m], lo cual les permite aprovechar eficientemente la energía del viento. Están fabricadas con una combinación de materiales de alta resistencia, como carbono y fibra de vidrio, que garantiza su durabilidad y capacidad para soportar las fuerzas aerodinámicas.

Cada pala cuenta con dos cascos aerodinámicos que se unen a una viga principal, la cual cumple una función crucial en términos de soporte y estabilidad. Está

configuración estructural permite que las palas capturen y conviertan la energía cinética del viento en energía mecánica para su posterior transformación de energía eléctrica (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas de las Palas	
Descripción	Características
Tipo de pala	Carcasa con perfil aerodinámico
Longitud de las palas	49 [m]
Material	Fibra de carbono y resina epoxica, reforzada de fibras de vidrio
Conexión de la pala	Raíces de acero insertadas
Forma de la capa de aire	Riso y FFA-W3
Peso aproximado	7.500 [kg]
Tipos de rodamientos	Rodamiento de bolas de doble hilera y cuatro puntos de contacto
Lubricación rodamiento	Por grasa con sistema de lubricación automáticos

Tabla 2-11: Especificaciones técnicas de las Palas

Fuente: General Specification V100

- Rotor: El rotor de la turbina eólica es una parte fundamental de su estructura y desempeña un papel crucial en la captura y conversión de la energía eólica, ver (Tabla 2-12).

El rotor de esta turbina en particular tiene un impresionante diámetro de 100 [m], lo cual le permite abarcar una amplia área y capturar una mayor cantidad de energía del viento. Está compuesto por tres palas aerodinámicas, diseñadas cuidadosamente para maximizar la eficiencia en la captura del viento.

Además de las palas, el rotor también incluye la nariz, que es una parte esencial para garantizar un flujo de aire óptimo y suavizar la interacción con el viento. En conjunto, las palas y la nariz del rotor trabajan en armonía para aprovechar al máximo la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica para la generación de electricidad (Vestas, 2013).

Especificaciones Técnicas del Rotor	
Descripción	Características
Diámetro	100 [m]
Área de barrido	7.850 [m ²]
Orientación	UpWind
Inclinación	6°
Cono de buje	2°
N° de cuchillas	3
Velocidad de rotación estático	14,9 [RPM]
Velocidad rango de funcionamiento dinámico	9,3-16,6 [RPM]
Dirección de rotación	Sentido horario

Tabla 2-12: Especificaciones técnicas del Rotor

Fuente: General Specification V100

A continuación, se analizará un enfoque de jerarquización, a los subsistemas y modos de fallos relacionados al modelo Vesta V100-2.0 [MW]. El objetivo principal es identificar y priorizar los riesgos asociados con cada subsistema, con el fin de tomar medidas preventivas y correctivas para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro de la turbina eólica.

2.3. SELECCIÓN DEL SISTEMA CRÍTICO

En la etapa 2 de la selección del sistema crítico, se empleará una herramienta específica para evaluar los subsistemas y modos de fallo más críticos que se encuentren presentes en el aerogenerador, para esto se utilizará la matriz de criticidad cualitativa de riesgo (MCCR).

La matriz desempeñará un papel fundamental en la etapa durante el proceso de selección de equipos con un grado de impacto significativo en la producción. En primer lugar, se utilizará para determinar el subsistema más crítico dentro del aerogenerador. Esto permitirá identificar aquellos componentes o sistemas que tienen un impacto significativo en el funcionamiento global de la turbina.

Una vez que se haya seleccionado el subsistema crítico, la matriz de criticidad cualitativa de riesgo (MCCR) también se utilizará para evaluar y determinar los modos de fallo más críticos asociados a dicho subsistema. Esta evaluación ayudará a reconocer las posibles fallas y los riesgos más relevantes que podrían afectar el rendimiento y la seguridad de la Turbina, ver (Tabla 2-14).

La utilización de la matriz de criticidad cualitativa de riesgo (MCCR) en estos dos casos permitirá una selección más precisa y fundamentada del sistema crítico, así como una comprensión más profunda de los modos de fallo más relevantes. Esto facilitará la implementación de medidas preventivas y correctivas adecuadas para garantizar un funcionamiento confiable y seguro al aerogenerador.

2.3.1. Modelo de criticidad (MCCR): Matriz de criticidad cualitativa de riesgo

El modelo de criticidad propuesto en este documento se basa en la estimación del factor de riesgo y puede adaptarse a las necesidades de las empresas generadoras de energías renovables, cómo el caso del parque eólico valle de los vientos y, en particular, de la turbina eólica de modelo Vesta V100 – 2.0 [MW] en el sector de Calama. Además, se presentarán las ecuaciones para la evaluación del modelo de criticidad basado en el factor de riesgo.

En la ecuación (1), corresponde a la evaluación del riesgo cualitativo.

$$\mathbf{Riesgo = FF * C} \quad (1)$$

Dónde:

FF = Frecuencia de fallos (número de fallos en un tiempo determinado).

En la ecuación (2), corresponde a la evaluación de las consecuencias de riesgo.

$$\mathbf{Consecuencia = SHA + IP + CDF} \quad (2)$$

Dónde:

C = Consecuencias de los fallos de seguridad, ambiental, calidad, producción, etc.

A continuación, es necesario seleccionar los factores y escalas de evaluación que están relacionados con las consecuencias y frecuencias de los fallos. Estos factores serán adaptados al subsistema del aerogenerador.

Frecuencia de fallos (FF)

1. Excelente: Una ocurrencia posterior a las 8.760 horas.
2. Bueno: Al menos una ocurrencia entre 4.380 y las 8.760 horas.
3. Promedio: Al menos una ocurrencia entre 2.190 y las 4.380 horas.
4. Pobre: Al menos una ocurrencia entre 730 y las 2.190 horas.
5. Muy pobre: Al menos una ocurrencia a las 730 horas.

Consecuencias de los fallos (C)

- **Impacto en Seguridad y Medio Ambiente (SHA)**
 5. Evento de alto impacto: Muerte e impacto catastrófico al medio ambiente.
 4. Evento de medio y alto impacto: Lesiones graves e impacto sensible al medio ambiente.
 3. Evento de bajo a medio impacto: Lesiones menos graves e impacto sin repercusión al medio.
 2. Evento bajo: Con leve impacto ambiental.
 1. Evento nulo: No afecta el impacto ambiental.
- **Impacto en producción (IP)**
 5. Pérdida de producción 60 – 100 % [MW], (>40 horas de parada).
 4. Pérdida de producción 40 – 60 % [MW], (20<X<40 horas de paradas).
 3. Pérdida de producción 35 – 40 % [MW], (5<X<20 horas paradas).
 2. Pérdida de producción 25 – 35 % [MW], (1<X<20 horas paradas).
 1. Pérdida de producción 0 – 25 % [MW], (< 1 horas de parada).
- **Costos directos de fallos (CDF)**
 5. Costos mayores a 300.000 dólares.
 4. Costos entre 100.000 a 299.999 dólares.

3. Costos entre 50.001 a 99.999 dólares.
2. Costos entre 5.001 a 50.000 dólares.
1. Costos bajos los 5.000 dólares.

Al final, estos costos estimados deben ajustarse en función al activo o entorno industrial. Es importante tener en cuenta los factores razón costo estimativo que pueden influir en los costos finales y adaptarse a las consecuencias de los fallos.

Luego los resultados se presentarán en una matriz de criticidad de 5x5 (Tabla 2-13), donde el eje vertical representa cinco niveles de frecuencias de fallos, mientras que el eje horizontal representa cinco niveles de consecuencias de los fallos.

Frecuencia						
5	A	A	MA	MA	MA	
4	M	M	A	A	MA	
3	M	M	M	A	MA	
2	B	B	B	M	A	
1	B	B	B	M	A	
		1	2	3	4	5
		Consecuencias				

Tabla 2-13: Matriz de Criticidad Cualitativa de Riesgo (MCCR)

Fuente: Elaboración propia

Se llevará a cabo un análisis de los factores de frecuencia y consecuencia de los fallos, asignándoles a cada uno un valor. Estos valores de criticidad pueden ser clasificados del 1 al 5 y se describen de la siguiente manera:

- B = Baja criticidad: Corresponde al color gris, con valores de $6 \leq Cr \leq 29$.
- M = Media criticidad: Corresponde al color amarillo, con valores de $30 \leq Cr \leq 49$.
- A = Alta criticidad: Corresponde al color verde, con valores de $40 \leq Cr \leq 59$.

- MA = Muy alta criticidad: Corresponde al color rojo, con valores de $60 \leq Cr \leq 100$.

Subsistema	Consecuencias			Total de las consecuencias	Frecuencia	Criticidad (C*F)
	SHA	IP	CDF			
Sistema hidráulico	3	4	4	11	2	22
Control y comunicación	1	3	2	6	1	6
Cuadro eléctrico	5	5	3	13	3	39
Transformador	3	4	3	10	4	40
Convertidor de frecuencia	3	3	3	9	1	9
Generador eléctrico	4	5	4	13	5	65
Torre	5	4	3	12	4	48
Yaw	2	3	3	8	1	8
Anemómetro y Veleta	3	3	2	8	2	16
Transmisión	2	5	4	11	4	44
Conjunto de eje principal	5	5	5	15	4	60
Bujes	1	3	4	8	5	40
Pitch	2	3	4	9	1	9
Palas	5	4	4	13	5	65

Tabla 2-14: Cálculo de criticidad de los Subsistemas

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de criticidad de los subsistemas mostrados indica lo siguiente:

- ✓ Subsistemas con muy alta criticidad: 21% del total.
- ✓ Subsistemas con alta criticidad: 29% del total.
- ✓ Subsistemas con media criticidad: 7% del total.
- ✓ Subsistemas con baja criticidad: 43% del total.

De acuerdo con el análisis porcentual presentado anteriormente, se observa que la mayoría de los subsistemas en estudio corresponden a sistemas de baja criticidad. No obstante, en este caso se prestará especial atención a los subsistemas con una criticidad muy alta, los cuales

representan el 21% del total analizar. En este contexto el generador eléctrico y las palas son los subsistemas considerados los más críticos con un valor de 65 seguido por el eje principal con un valor de 60. Por consiguiente, se seleccionará uno de los tres equipos más críticos, en este caso el subsistema de palas. Posteriormente, se procederá al desglose de los componentes de este subsistema para llevar a cabo el análisis de modos y efectos de fallas (AMEF).

2.4. DESARROLLO DE AMEF Y CRITICIDAD APLICADO AL SUBSISTEMA DE PALAS

A continuación, se llevará a cabo el análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) del subsistema de palas identificando los modos de fallos, ver (Figura 2-3). No obstante, se procederá a detallar los pasos principales para su elaboración:

1. Se analizará el subsistema de las palas del aerogenerador.
2. Se determinará la función del subsistema de palas dentro del aerogenerador.
3. Se identificará los modos de fallos físicos (Componentes).
4. Se usará la matriz de criticidad cualitativa de riesgo (MCCR) utilizado en los subsistemas para evaluar el nivel modos de fallos físicos.
5. Se define las causas probables de cada modo de fallo físico.

Además, esta metodología es respaldada por la Norma ISO (55000, 2014), que define los requerimientos técnicos para un sistema de gestión de activos, con el objetivo de establecer un marco de políticas que permita alcanzar metas, fijar y establecer procesos.

2.4.1. Definición de los modos de fallos y análisis de criticidad

A continuación, se presenta los modos de fallos físicos del sistema crítico, ver (Figura 2-3):

- **Aspas:** En los aerogeneradores modernos, generalmente se utilizan tres aspas debido a que ofrecen una menor oscilación y un mejor equilibrio de las fuerzas giroscópicas. Estas aspas están fabricadas principalmente con materiales ligeros y altamente resistentes, como la fibra de carbono y fibra de vidrio combinada con resina epóxica. Pueden alcanzar longitudes de hasta 50 metros y girar a velocidades que oscilan entre las 10 y 60 [RPM]. Para las turbinas de gran tamaño, las velocidades más comunes son de 10 a 20 [RPM]. Las aspas se montan sobre el buje del aerogenerador.
- **Buje:** Este componente tiene la función de unir las palas y transmitir la potencia eólica captada por el rotor hacia la caja de velocidades. Por lo general, el buje es una estructura metálica hueca que actúa como un cubo rígido.
- **Nariz:** La nariz es una estructura cónica que se enfrenta al viento y redirige hacia el tren de motor. Gracias a su forma aerodinámica, evita la formación de turbulencias y protege al aerogenerador de posibles daños.

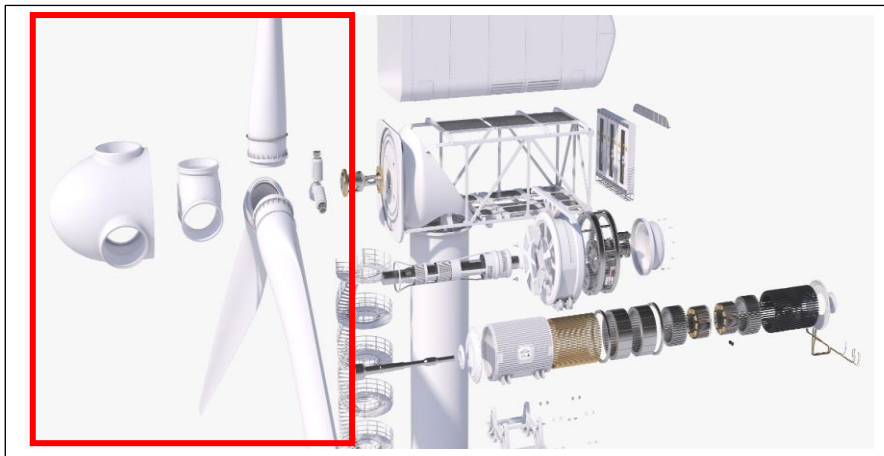


Figura 2-3: Esquema de ubicación del subsistema de Palas

Fuente: Pagina Web Turbosquid

A continuación, Se toma como referencia la matriz de criticidad cualitativa de riesgo (MCCR) utilizada para los subsistemas del aerogenerador y se procederá aplicar a nivel de modos de fallos, ver (Tabla 2-15).

Modos de fallos físicos (componentes)	Consecuencias			Total de las consecuencias	Frecuencia	Criticidad (C*F)
	SHA	IP	CDF			
Aspas	5	5	5	15	4	60
Nariz	3	5	5	13	3	39
Buje	2	5	5	12	3	36

Tabla 2-15: Cálculo de criticidad de los Modos de fallas del subsistema de las palas

Fuente: Elaboración propia

Se observa que las Aspas son los componentes más críticos del subsistema de palas, el cual resalta por su considerable valor de 60 (muy alta criticidad). A continuación, se procederá a identificar las causas probables analizadas en la tabla resumen referente al análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) relacionados a los componentes físicos del subsistema de palas.

2.4.2. Causas probables

En el contexto de mantenimiento, las causas probables se refieren a factores o condiciones que pueden ser responsable de un fallo o problema en un equipo o sistema. Por consiguiente, se presentará la tabla resumen del análisis de los modos y efectos de fallos (AMEF) correspondiente al subsistema de palas del aerogenerador, el cual incluirá la criticidad de cada uno de los modos de fallos físicos y el desglose de las causas probables, ver (Tabla 2-16).

Análisis de modos y efectos de fallos (AMEF)						
Turbina Eólica Vestas V100 - 2.0 [MW]						
Subsistema	Función	Modos de fallos físicos (componentes)	Efecto	Criticidad	Valor	Causas probables
Palas	Capturan la energía del viento y la transforma en energía mecánica para impulsar el rotor del aerogenerador.	Aspa	Perdida de la capacidad aerodinámica.	Muy alta	60	Aspas con presencia de pandeo
						Estructura de las aspas con grietas
						Estructura de las aspas con delaminación
						Aspas con presencia de flexión
		Nariz		Media	39	Estructura de la nariz con grietas
						Daños por impactos de objetos extraños en la nariz
						Soltura de la nariz por mala instalación
		Buje		Media	36	Presencia de corrosión en la nariz
						Estructura de buje con grietas
						Buje con presencia de desalineación
Problemas en el mecanismo de orientación del buje						
						Presencia de corrosión en el buje

Tabla 2-16: Cálculo de análisis de modos y efectos (AMEF)

Fuente: Elaboración propia

Tras llevar a cabo el análisis de modos y efectos de fallos (AMEF), resulta beneficioso desarrollar un plan de mantenimiento para cada uno de los modos de fallos físicos, Esto nos permite establecer medidas correctivas y preventivas que contribuyen a la mejora continua de los procesos y sistemas, aumentando la eficiencia y confiabilidad. Todo esto con el propósito de utilizar esta metodología como base de información para el caso de estudio a desarrollar.

2.4.3. Planes de acción

Se implementará un plan de acción específico para el mantenimiento de los modos de fallos físicos del subsistema de palas, ver (Tabla: 2-17). Sin embargo, es importante resaltar que este caso de estudio solo se seleccionará una turbina eólica de las 45 presentes en el parque eólico valle de los vientos. A continuación, se procederá a identificar los pasos que componen el plan de acción:

1. Seleccionar el subsistema palas para el desarrollo del plan de acción a los modos de fallo físicos (componentes).
2. Identificar los tres modos de fallos físicos con su criticidad asignada previamente.
3. Definir las causas probables de los tres modos de fallos físicos del subsistema de palas.
4. Definición de las tareas de mantenimiento correspondientes a cada modo de fallo físico.
5. Estimación de la frecuencia de aplicación para cada tarea de mantenimiento.

6. Designación del especialista responsable de esa área.
7. Estimación de los costos de los planes de mantenimientos.
8. Designación de las horas de mantenimiento anuales por cada tarea de mantenimiento.

Se establecerá un plan de estrategia detallado para abordar eficientemente los problemas relacionados con las aspas del aerogenerador. Es relevante destacar que durante el análisis se evaluaron diversas estrategias de mantenimiento basado en condición, las cuales se centran en el monitoreo y mantenimiento de los activos. Es importante mencionar que las tareas reflejadas en el plan de acción no son las únicas. Sin embargo, solo se incluirán aquellas que se encuentran en la tabla mencionada anteriormente.

2.4.4. Definición de estrategias de mantenimiento

Es importante destacar que en la tesis a desarrollar se logrará identificar las principales estrategias de mantenimiento basado en condición. Sin embargo, se recomienda llevar a cabo una aplicación más elaborada y detallada en el futuro, donde se considerará el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) como una herramienta para lograr una estrategia integral de mantenimiento más efectiva.

También es importante mencionar que, debido a la gran envergadura y los considerables costos de los aerogeneradores, se están implementando sistemas de monitoreo más frecuentes en estos equipos con el objetivo de maximizar su vida útil.

El mantenimiento sintomático consiste en medir e identificar los síntomas que presentan los equipos antes de fallar. Cuando se detectan síntomas críticos, se debe planificar acciones de mantenimiento preventivas como son las tareas a condición. Sin embargo, existen máquinas que no presentan síntomas antes de fallar. Por esta razón, se considera la norma ISO (17359, Ene 2018), la cual establece los pasos a seguir al implementar un programa de monitoreo de condición de máquinas.

El subsistema de palas de una turbina eólica desempeña un papel fundamental al captar la energía del viento y convertirla en energía eléctrica. Para garantizar su rendimiento óptimo y evitar costosas fallas, es fundamental implementar un programa de mantenimiento sintomático programado basado en condiciones.

Subsistema	Modo de fallo físico (componentes)/Criticidad	Causas probables	Tipo de mantenimiento	Tarea de mantenimientos	Frecuencia de aplicación	Especialista responsable	Costos del plan de mantenimiento en dólares/año	Horas de Mtto/anales
Palas	Aspas/Muy alta	Aspas con presencia de pandeo	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
		Estructura de las aspas con grietas	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
		Estructura de las aspas con delaminación	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
		Aspas con presencia de flexión	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
	Nariz/Media	Estructura de la nariz con grietas	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
		Daños por impactos de objetos extraños en la nariz	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
		Soltura de la nariz por mala instalación	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
		Presencia de corrosión en la nariz	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
	Buje/Media	Estructura de buje con grietas	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
		Buje con presencia de desalineación	Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12
			Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12
			Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6
Problemas en el mecanismo de orientación del buje		Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12	
		Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12	
		Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6	
Presencia de corrosión en el buje		Mantenimiento basado en condición	Medición termográfica en los devanados	Mensual	Técnico electromecánico	\$ 5.000.-	12	
		Mantenimiento basado en condición	Medición Ultrasonido	Mensual	Técnico electromecánico		12	
		Mantenimiento basado en condición	Medición por rayos X	Trimestral	Técnico electromecánico		6	

Tabla 2-17: Plan de acción a los modos de fallos físicos del subsistema de palas

Fuente: Elaboración propia

Como punto de partida, se estima que las tareas de medición de termografía y ultrasonido se realizarán mensualmente durante 1 [hrs], mientras que la medición por rayos x se efectúa trimestralmente durante 1.5 [hrs]. Por consiguiente, el total de mantenimientos preventivos (considerando solo los mantenimientos basados en condición) asciende a 360 [hrs/año]. Dado que el equipo opera 8.760 [hrs/año], se deben considerar las horas mantenimiento preventivo, lo que conlleva a que las horas de operación del equipo sean de 8.400 [hrs/año].

2.4.5. Integración de la RVI en el AMEF y Plan de Acción al caso de estudio

En el próximo capítulo, se llevará a cabo el desarrollo de una experiencia de realidad virtual inmersiva (RVI) con el fin de integrar los resultados obtenidos en las tablas de análisis de modos y efectos de fallos (AMEF), así como el plan de acción correspondiente al subsistema más crítico seleccionado previamente. Es importante mencionar que en este caso en particular solo se abordará un modo de fallos físicos, para implementación del aplicativo de realidad virtual inmersiva (RVI), específicamente el relacionado con las aspas del subsistema de palas, por su muy alta criticidad. No obstante, en un escenario real, sería necesario implementar todos los modos de fallos en el aerogenerador.

Esta implementación permitirá llevar a cabo las acciones de mantenimiento en un entorno virtual interactivo y práctico. De esta manera, los participantes podrán comprender de forma más efectiva las herramientas relacionadas con el mantenimiento preventivo en el contexto operativo de un aerogenerador.

Es fundamental contar con personal capacitado y especializado en el mantenimiento de turbinas eólicas, así como utilizar los equipos y herramientas apropiados. Además, se recomienda mantener un registro detallado de las intervenciones realizadas, los síntomas detectados y las acciones a considerar. Esto simplificará el proceso de inspecciones y mantenimientos futuros, garantizando así un seguimiento adecuado de las actividades realizadas.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA REALIDAD VIRTUAL INMERSIVA

3. **DESARROLLO DE LA REALIDAD VIRTUAL INMERSIVA**

Para el desarrollo de la plataforma de realidad virtual inmersiva (RVI), se necesita definir los requerimientos y características del sistema, es una etapa fundamental en el desarrollo de cualquier proyecto de software. Esto implica describir las funciones que el sistema debe llevar a cabo y la información que debe manejar, con el objetivo de comprender y satisfacer las necesidades del usuario. En este capítulo, se presentarán los distintos tipos de requerimientos necesarios para lograr el desarrollo de la plataforma de realidad virtual inmersiva propuesta.

3.0.1. Requerimientos funcionales

Se desarrollará un sistema de realidad virtual inmersiva que cumpla con los siguientes requerimientos:

- El sistema permitirá visualizar el parque eólico valle de los vientos en el sector de Calama.
- El sistema permitirá la manipulación y la visualización de un modelo 3D de la turbina eólica Vestas V100-2.0[MW].
- El sistema permitirá el acceso a documentos relacionados con la tabla de análisis de modos y efectos de fallos (AMEF) de las palas.
- El sistema permitirá el acceso a documentos relacionados con el plan de acción de los modos de fallos físicos de las aspas.
- El sistema permitirá visualización de elementos relacionados con el subsistema del aerogenerador.

La documentación a la que se podrá acceder es el análisis realizado mediante la metodología AMEF para el aerogenerador Vestas V100-2.0[MW].

3.0.2. Requerimientos Técnicos

Para desarrollar un entorno de programación inmersiva en 3D, es esencial contar con un motor gráfico que cumpla ciertas condiciones, como documentación completa, soporte para múltiples plataformas, compatibilidad con diversos lenguajes de programación, una curva de aprendizaje manejable y recursos adicionales disponibles. Por esta razón, la elección adecuada para esta tarea es el motor gráfico Unity 3D.

El entorno se desarrollará por medio de Unity 3D Versión 2019.2.13f1, junto con la aplicación de Setup Oculus Quest 2. Para ello, se utilizarán los equipos de realidad virtual correspondientes, ver (Figuras 1-1) y (Figura 1-2). Esto permite desarrollar juegos y experiencias de Realidad virtual en la plataforma grafica de Unity. Además, se puede optar por utilizar un cable de Oculus Link, ver (Figura 3-1). Para una mejor conectividad entre el PC y las gafas, aunque las gafas Oculus también admiten conexión inalámbrica. Es importante tener en cuenta los siguientes requisitos técnicos básicos que se detallan en la siguiente Tabla, ver (Tablas 3-1). Se muestra los requerimientos para un computador de escritorio o portátil, incluyendo la tarjeta grafica necesaria (Meta, 2023).

Requerimientos Técnicos del Notebook o Computador de escritorio		
Descripción	Recomendado	Mínimo
Tarjeta grafica	NVIDIA 3060	NVIDIA 960 46
Memoria	16 GB RAM	8 GB RAM
Procesador	Intel i5-4590/AMD Ryzen 5 1500X o superior	
Sistema operativo	Windows 11	Windows 10
Puertos USB	Un puerto USB	

Tabla 3-1: Requerimientos técnicos del computador

Fuente: Meta

A continuación, se presentan dos tablas que muestra los tipos de tarjetas gráficas y los procesadores más utilizadas en el mercado y que cumple con las condiciones requeridas, ver (Tabla 3-2) y (Tabla 3-3):

- Tarjeta gráfica de modelo NVIDIA:

GPU compatibles con Link	Compatible	No compatible actualmente
NVIDIA Titan Z		X
NVIDIA Titan X	X	
NVIDIA GeForce GTX 970	X	
NVIDIA GeForce GTX 1060 (ordenador de sobremesa, 3 GB)		X
NVIDIA GeForce GTX 1060 (ordenador de sobremesa, 6 GB)	X	
NVIDIA GeForce GTX 1060M		X
NVIDIA GeForce GTX 1070 (todas)	X	
NVIDIA GeForce GTX 1080 (todas)	X	
NVIDIA GeForce GTX 1650		X
NVIDIA GeForce GTX 1650 Súper	X	
NVIDIA GeForce GTX 1660	X	
NVIDIA GeForce GTX 1660 TI	X	
NVIDIA GeForce RTX 20-series (todas)	X	
NVIDIA GeForce RTX 30-series	X	
NVIDIA GeForce RTX 40-series	X	

Tabla 3-2: Requerimientos de la GPU (NVIDIA) compatibles con Link

Fuente: Meta

- Tarjeta gráfica de modelo AMD:

GPU compatibles con Link	Compatible	No compatible actualmente
AMD 200 series		X
AMD 300 series		X
AMD 400 series	X	
AMD 500 series	X	
AMD 5000 series	X	
AMD 6000 series	X	
AMD Vega series	X	

Tabla 3-3: Requerimientos de la GPU (AMD) compatibles con Link

Fuente: Meta

Además, los dispositivos estarán equipados con el cable Oculus Link, ver (Figura 3-1). Elemento mencionando anteriormente, para proporcionar un soporte gráfico mejorado a las gafas. Estos cables son simples y tienen una entrada USB y una salida tipo C o USB 3.0, lo que garantiza una conexión estable y de alta calidad.



Figura 3-1: Cable Oculus Link

Fuente: Pagina Web de Mercado libre

Es esencial cumplir con estos requisitos técnicos para asegurar el correcto desarrollo de la plataforma y permitir la conexión a la interfaz gráfica de simulación. Al seguir estos requisitos se garantiza un rendimiento óptimo y una experiencia de usuario, fluida y satisfactoria.

Dado que la implementación de la realidad virtual conlleva gastos y consumo de material para el desarrollo de la plataforma de entorno inmersivo, a continuación, se detallarán los costos asociados a los elementos a utilizar y horas hombre ejecutadas, se invita a observar las tablas del (Anexo A) para más detalles.

3.2. DISEÑO DEL APLICATIVO PARCIAL

Vamos a llevar a cabo el proceso de desarrollo de un simulador de realidad virtual para la turbina eólica Vestas V100-2.0 [MW]. Este simulador incluirá los modos de fallos físicos (componentes) correspondiente al subsistema de palas. Antes de comenzar, necesitaremos personalizar la plantilla de trabajo en Unity. Esto implica descargar paquetes que facilitarán la interacción de realidad virtual y los procesos de instalación de cada uno de ellos.

A continuación, presentaremos los siguientes subtítulos que explicarán paso a paso el desarrollo de la plataforma y los paquetes que deben ser descargados.

3.2.1. 3D Sample Scene (URP)

El primer paso para crear la plantilla de trabajo es seleccionar la escena 3D (URP), que corresponde Universal render pipeline, ver (Figura 3-2).

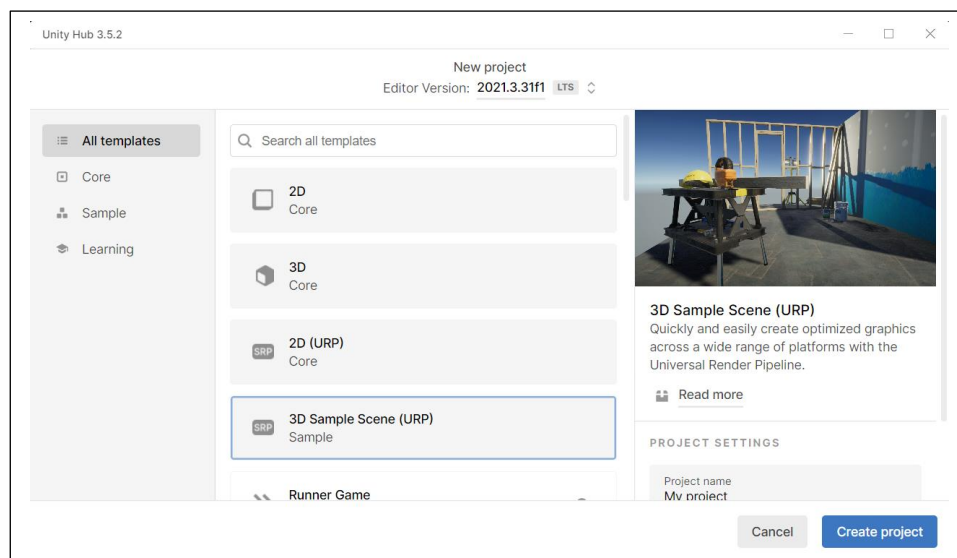


Figura 3-2: Proceso de descarga de 3D Sample Scene (URP)

Fuente: Programa Unity Hub

Una vez que se ingresa a la escena del nuevo proyecto, ver (Figura 3-3). Se proceso a analizar cada pestaña, que son herramientas fundamentales para llevar a cabo el proyecto. Lo cual se va a proporcionar una descripción breve de cada pestaña que estarán encasilladas con cuadros de colores que se muestra en la imagen mencionada anteriormente:

- Cuadro verde: En la pestaña de “Hierarchy” se muestra la jerarquía de los objetos en la escena de juego.
- Cuadro amarillo: En las pestañas “Scene”, “Game”, “Package Manager” y “Asset store” se encuentran componentes claves del entorno de desarrollo. La pestaña “Scene” muestra la escena de trabajo, la pestaña “Gamer” permite visualizar el videojuego, y las últimas dos pestañas son Utilizadas para configuración y descargas de paquetes.
- Cuadro celeste: En las pestañas de “Project” y “Console” se encuentra la visualización de archivos y carpetas del proyecto y los mensajes de advertencia y errores respectivamente.
- Cuadro rojo: En las pestañas “Inspector”, “Lighting” y “Build Settings” se encuentran diferentes herramientas, la pestaña “Inspector” muestra las propiedades y componentes de un objeto, la pestaña “Lighting” se encarga de la configuración de la iluminación y la pestaña “Buid Settings” se utiliza para compilar los proyectos en diferentes plataformas como Windows, macOS, iOS, Android, entre otras.

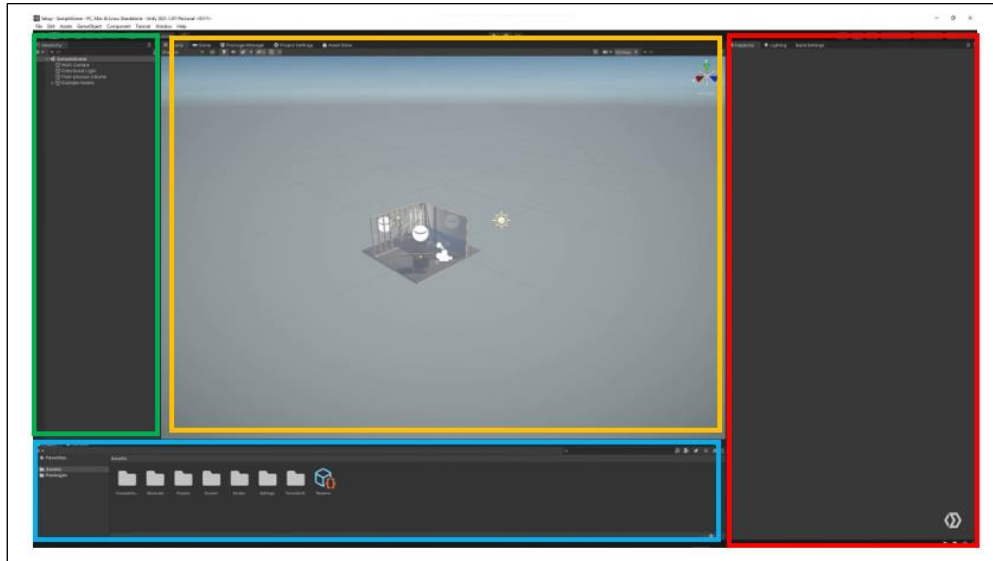


Figura 3-3: Escena del nuevo proyecto Setup

Fuente: Programa Unity 2021.3.31f1

3.2.1. XR Interaction Toolkit

El paquete es una herramienta descargable en Unity que proporciona un conjunto de scripts y componentes para facilitar el desarrollo de experiencias de realidad virtual, ver (Figura 3-4).

A continuación, se explica para que sirve este paquete:

- **Interacción con objetos:** Permite interactuar con objetos virtuales al proporcionar componentes que permiten agarrar, lanzar, tocar y manipular los objetos.
- **Interfaz de usuario (UI) en XR:** También ofrece componentes para crear interfaces de usuario, lo que significa que puedes construir botones, menús y otros elementos para mejorar la interacción del usuario.

- Interacción con el entorno: Facilita la interacción con el entorno virtual al que permitarte configurar áreas de transportación y colisión con objetos.
- Configuración multiplataforma: Te permite desarrollar tu proyecto XR y asegurarte de que funcione en diferentes dispositivos, lo que brinda compatibilidad y accesibilidad a una amplia gama de usuarios.

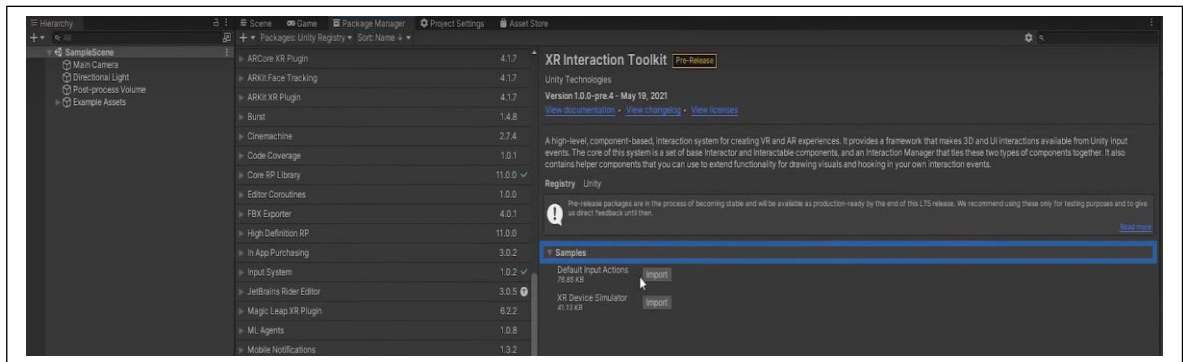


Figura 3-4: Proceso de descarga del paquete XR Interacción Toolkit

Fuente: Programa Unity 2021.3.31f1

Este paquete ofrece una serie de componentes y scripts que simplifican la interacción con objetos, la creación de interfaces de usuario, la interacción con el entorno y la configuración en Unity. Con estos recursos, es más fácil y eficiente desarrollar experiencias interactivas y personalizadas en proyectos de realidad virtual.

3.2.1. OpenXR Plugin

Está extensión ofrece integración y compatibilidad con la plataforma OpenXR en proyectos de realidad virtual, ver (Figura 3-5).

A continuación, se explica las funciones que proporciona este paquete:

- Compatibilidad con múltiples dispositivos: Permite desarrollar proyectos que sean compatibles con varios dispositivos sin tener necesidad de escribir códigos

especiales, lo que facilita la accesibilidad y la implementación en diferentes plataformas.

- **Optimización de rendimiento:** Asegura una integración fluida y un rendimiento óptimo en la ejecución de aplicaciones de realidad virtual, mejorando la experiencia del usuario y garantizando un funcionamiento eficiente.
- **Acceso a funcionalidades avanzadas:** Incluye características como el seguimiento de posición y orientación, lo que brinda mayor precisión y control en la manipulación de los objetos, y otras funcionalidades avanzadas para enriquecer las experiencias de realidad virtual.
- **Facilidad de desarrollo:** Simplifica el proceso de desarrollo de aplicación de realidad virtual, al proporcionar una interfaz unificada y coherente para trabajar, lo que agiliza la creación y permite a los desarrolladores concentrarse en la implementación de ideas creativas sin complicaciones técnicas.

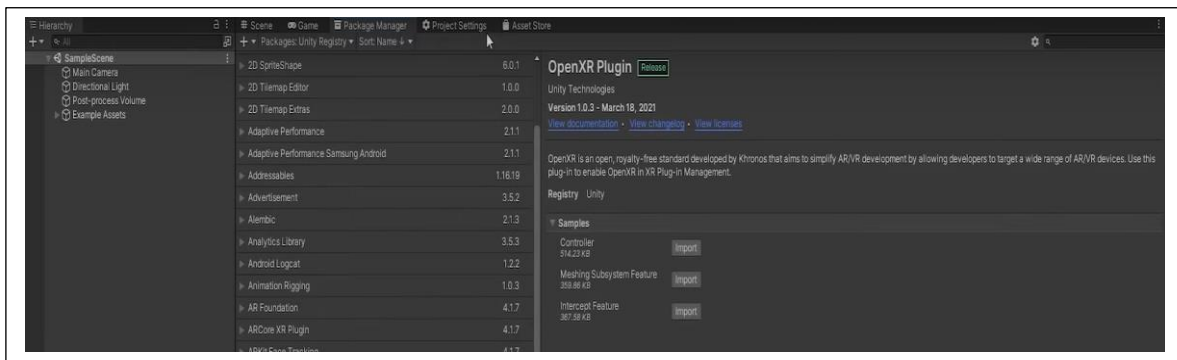


Figura 3-5: Proceso de descarga del paquete OpenXR Plugin

Fuente: Programa Unity 2021.3.31f1

3.2.1. Arquitectura del sistema

Se presenta la arquitectura del sistema para el simulador de fallas del subsistema de palas, por medio de la realidad virtual inmersiva (RVI), con el objetivo de cumplir cada uno de los puntos establecidos, ver (Figura 3-6).

En esta arquitectura se muestra los componentes que interactúan con la aplicación, los cuales son:

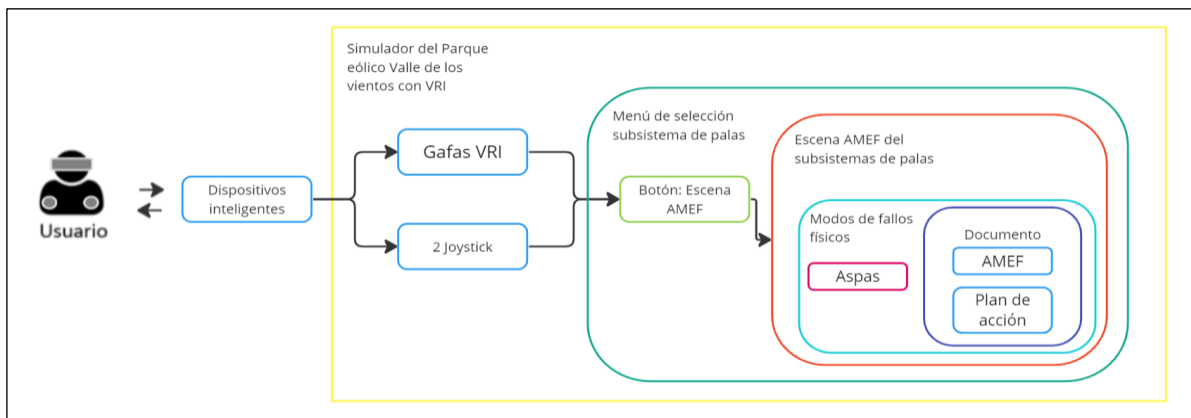


Figura 3-6: Arquitectura del sistema

Fuente: Elaboración propia

Entradas: El sistema de Oculus Quest 2 cuenta como entrada al aplicativo inmersivo:

- Gafas de realidad virtual (VR): Estas gafas, en este caso las Oculus Quest 2, son el medio a través del cual el usuario puede visualizar los escenarios de realidad virtual, lo que resulta fundamental para lograr una experiencia inmersiva. Estas gafas procesan la aplicación y permiten al usuario sumergirse en el entorno virtual.
- Joystick: Este instrumento, compuesto por dos Joysticks ubicados en cada de las manos del usuario, le permite interactuar con los objetos y elementos del entorno virtual. Estos

controles, en el caso de las Oculus Quest 2, ofrecen una forma intuitiva de manipular y navegar por el entorno virtual.

Salidas: Las salidas del sistema están relacionadas con los componentes visuales que se desarrollan a través de las gafas de realidad virtual. Al ingresar a la inmersión, el usuario podrá visualizar los componentes y además se proporcionará información en forma de capas.

- Escena de menú de inicio: El simulador cuenta con una pestaña de menú de inicio que muestra el contexto operacional de la turbina eólica V100-2.0 [MW] y proporciona otra pantalla que muestra los subsistemas más críticos, determinando el subsistema de palas como el más crítico, además se proporcionará un botón de acceso a la escena AMEF del aerogenerador, ver (Figura 3-7).

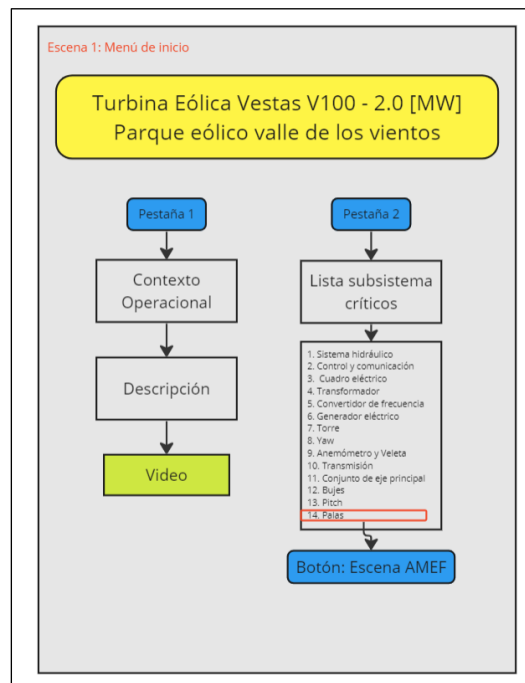


Figura 3-7: Representación de la escena 1

Fuente: Elaboración propia

- Escena AMEF: En esta sección, el usuario podrá visualizar la herramienta AMEF aplicada a los subsistemas de palas, donde además se explicará el plan de acción de manera didáctica sobre las aspas, cómo uno de los modos de fallo físico con mayor criticidad, ver (Figura 3-8).

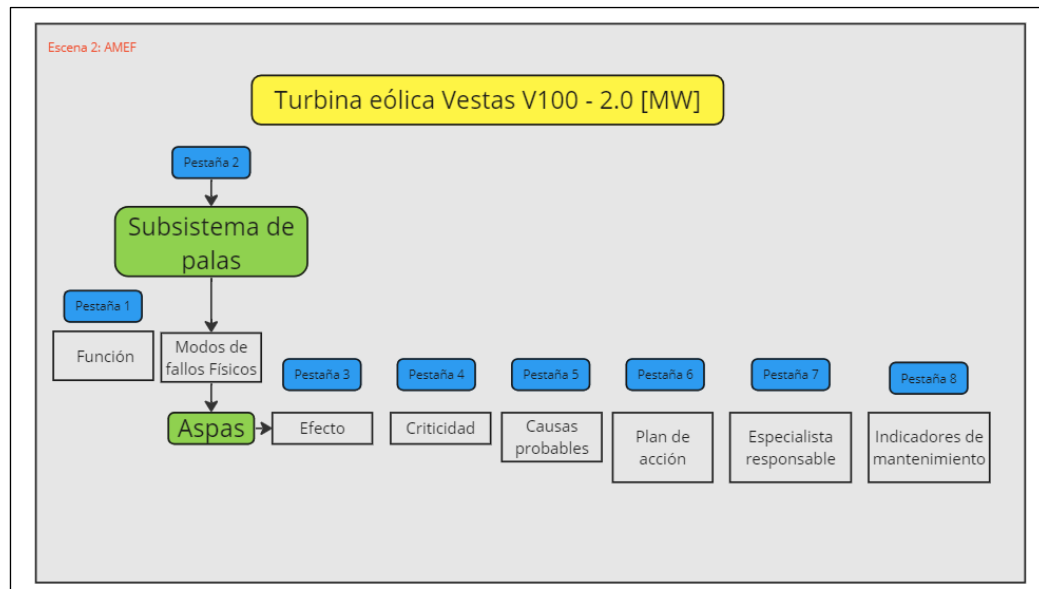


Figura 3-8: Representación de la escena 2

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Elementos de mantenimiento con VR

Se procederá a adquirir modelos de 3D de aerogeneradores a través de una página web (TurboSquid, 2023) que se dedica a la venta y descarga gratuita de modelos para el desarrollo de aplicaciones de realidad virtual, ver (Figura 3-9) y (Figura 3-10). Específicamente, se ha adquirido y descargado el modelo Turbina eólica Vesta V100 para su uso en el desarrollo de la plataforma de realidad virtual inmersiva. Este modelo será utilizado para representar de manera precisa la turbina eólica en el entorno virtual.

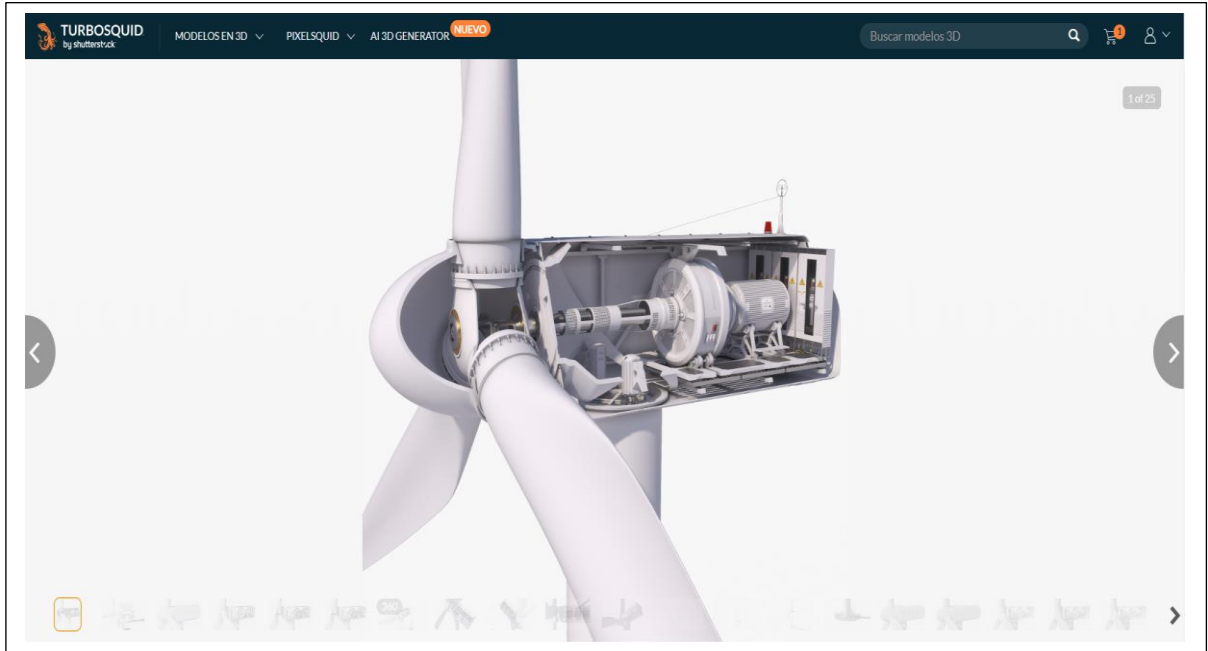


Figura 3-9: Turbina eólica de modelo Vestas

Fuente: Pagina Web de TurbinaSquid

El modelo de la turbina eólica, ver (Figura 3-9). Se puede observar los componentes fundamentales para el desarrollo del aplicativo, este modelo proporciona una representación detallada y precisa de los componentes necesarios para la plataforma de realidad virtual.

Por otro lado, el modelo de la otra turbina adquirido, ver (Figura 3-10). Es similar al de la turbina Vestas V100-2.0 [MW], este modelo comparte características y detalles similares a la turbina mencionada anteriormente, lo que se convierte en una opción adecuada para su uso en la plataforma de realidad virtual.



Figura 3-10: Turbina eólica de modelo Vestas V150 – 4.2 [MW]

Fuente: Pagina Web de TurbinaSquid

3.3. IMPLEMENTACIÓN

En el siguiente apartado, se proporcionará una descripción detallada del funcionamiento de la aplicación de realidad virtual inmersiva (VRI), centrándonos específicamente en los aspectos virtuales que contribuyen a la construcción de la plantilla. A través de explicaciones claras y ejemplos visuales, se explorará cómo esta aplicación parcial ofrece una experiencia inmersiva única, además se analizará el enfoque de programación conceptual que se ha utilizado en su desarrollo.

3.3.1. Escena de inicio de interfaz gráfica (plataforma de PC)

El motor gráfico Unity nos brinda la capacidad de implementar múltiples escenas que componen el entorno de realidad virtual Inmersiva, ver (Figura: 3-11). En una de estas escenas, se encuentra la ventana de inicio que permite observar el parque eólico Valles de los Vientos en el sector de Calama. Se ha trabajado en la representación gráfica de este entorno para lograr el mayor nivel de realismo posible. Además, esta escena incluye un menú de presentación explicando el contexto operacional de la Vestas V100-2.0 [MW] y los subsistemas más críticos representados en los cálculos de criticidad. Donde se podrá seleccionar el subsistema más crítico, previamente identificado en el capítulo anterior, ver (Tabla 2-14).

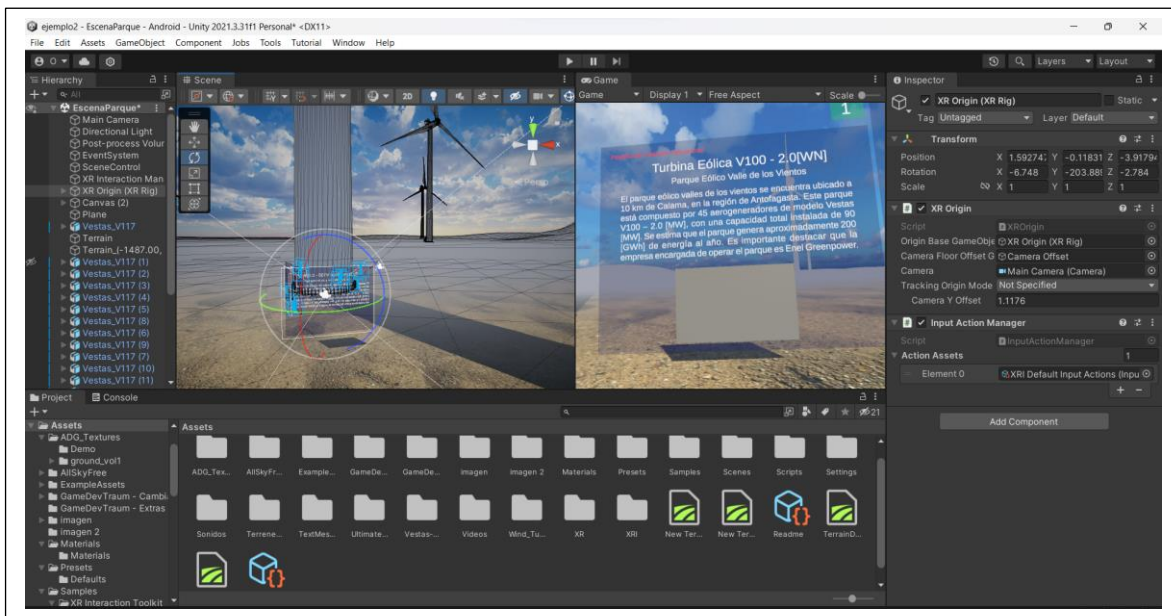


Figura 3-11: Escena de inicio de interfaz gráfica (plataforma PC)

Fuente: Programa Unity 2021.3.31f1

A continuación, se explorará la escena de inicio utilizando las gafas de realidad virtual inmersiva de Oculus Quest 2.

3.3.1. Escena de inicio de la interfaz gráfica (plataforma de VRI)

La escena de inicio de la realidad virtual inmersiva, ver (Figura: 3-12). Nos ofrece una vista completa del parque eólico “Valle de los Vientos” con las dimensiones reales de las turbinas eólicas Vestas V100 – 2.0[MW]. En esta escena, se presenta un panel de texto que describe el contexto operacional de la turbina eólica y además un video aéreo del parque eólico.

Para visualizar estas escenas, se requieren las gafas Oculus Quest 2 de realidad virtual inmersiva, y se utilizan los dos joysticks que sirven para seleccionar y cargar las escenas.

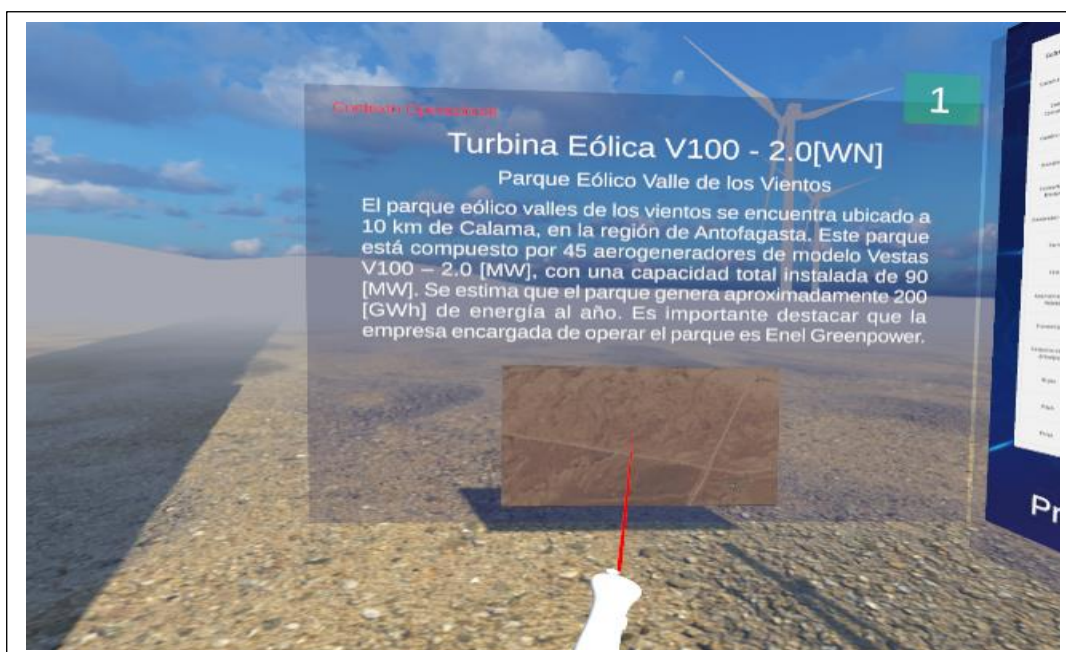


Figura 3-12: Escena de inicio de interfaz gráfica (plataforma VRI)

Fuente: Elaboración propia

En la segunda pestaña se observará una tabla de criticidad del subsistema de la turbina eólica V100 - 2.0 [MW], ver (Figura 3-13). Donde el subsistema con mayor criticidad representado son las palas de la turbina. Además, abra un botón “escena AMEF” que nos llevara al análisis de modos y efectos de fallos del subsistema de palas.

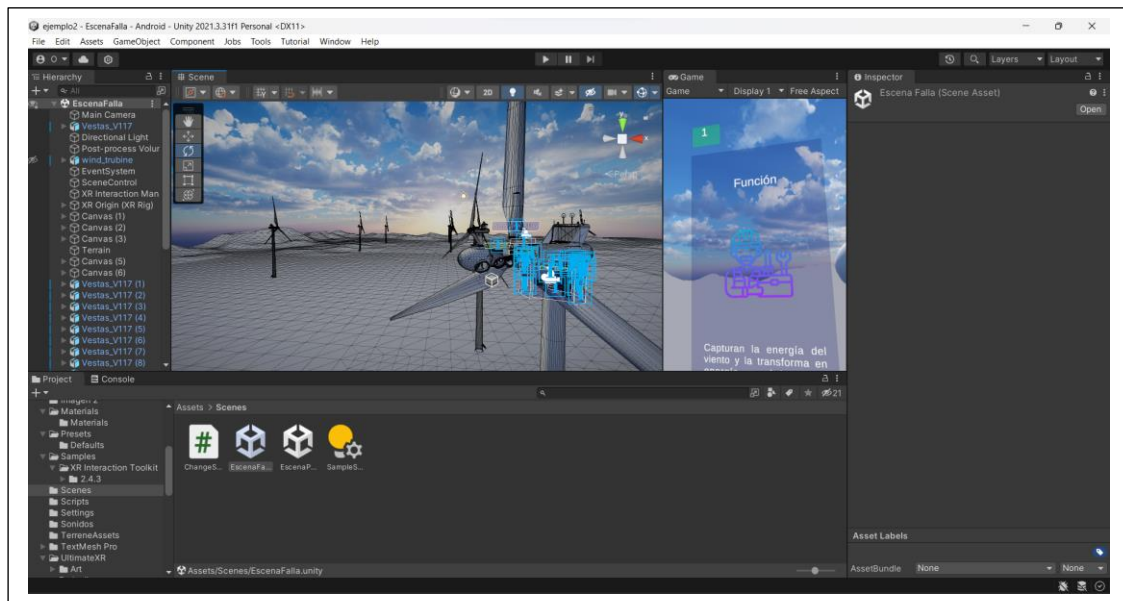


Figura 3-14: Escena 2 de simulador de fallas del aerogenerador

Fuente: Programa Unity 2021.3.31f1

A continuación, se examinará las imágenes captadas en la escena AMEF para observar la interacción y el aprendizaje de la realidad virtual inmersiva de la turbina eólica Vestas V100–2.0[MW].

3.3.4. Escena de AMEF al subsistema de palas (plataforma VRI)

En esta escena se explora en detalle la turbina eólica Vestas V100-2.0[MW], lo que permite una representación visual de las piezas relacionadas con el subsistema de las palas. En esta representación se muestran los modos de fallos físicos (componentes) utilizando una estructura basada en el análisis de modos y efectos de fallos (AMEF), ver (Figura: 3-15).

En la pestaña 1 se encuentra una breve descripción del funcionamiento del subsistema de palas. Mientras tanto, en la pestaña 2 se detallan los modos de fallos físicos (componentes) que afectan a las aspas, la nariz y el buje, con el componente de mayor criticidad resaltado en color rojo, el cual se identifica como las aspas.

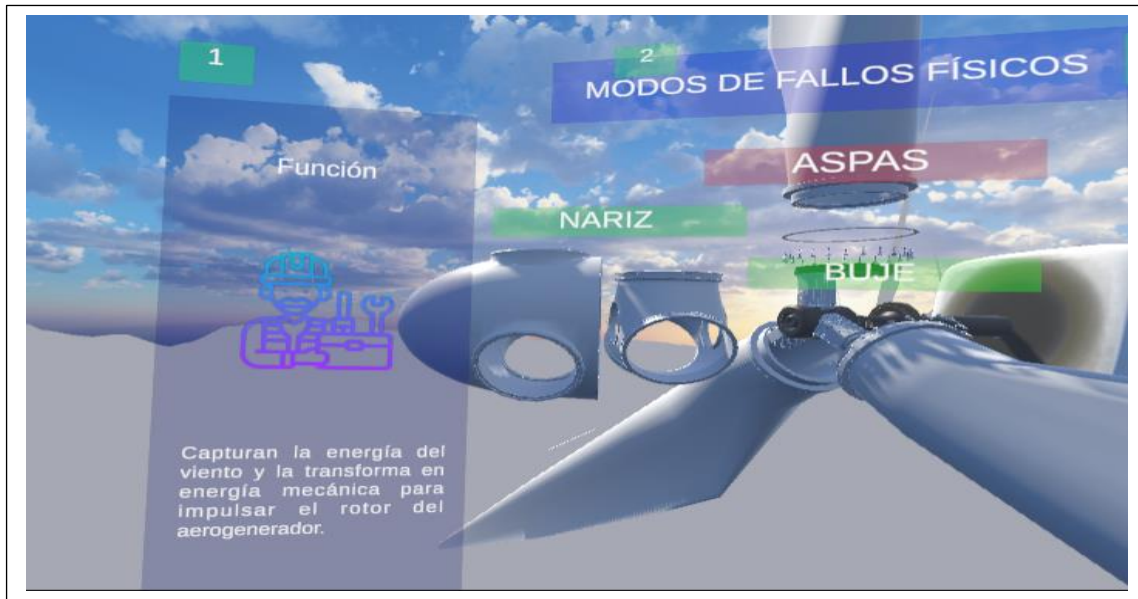


Figura 3-15: Escena AMEF, pestañas 1 y 2 en RVI

Fuente: Elaboración propia

En la pestaña 3 se identifica el efecto producido por el desperfecto de las aspas. Luego, en la pestaña 4 se muestra el nivel de criticidad obtenida por cada modo de falla físico del subsistema de las palas. Por último, en la pestaña 5 se detallan las posibles causas posibles relacionadas con el modo de fallo físico de las aspas, ver (Figura 3-16).

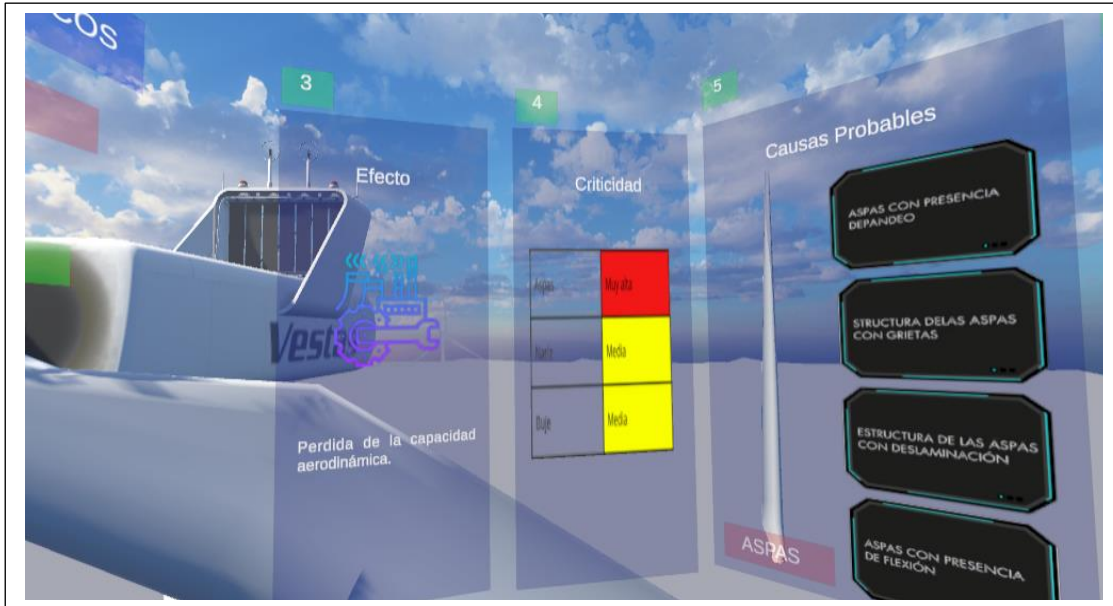


Figura 3-16: Escena AMEF, pestañas 3, 4 y 5 en RVI

Fuente: Elaboración propia

En la pestaña 6 se observa el plan de acción para un área específica relacionada con el modo de fallo físico de las aspas, ver (Figura: 3-17).



Figura 3-17: Escena AMEF, pestañas 6 en RVI

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la pestaña 7 se identifica al especialista responsable, que sería el técnico electromecánico, ver (Figura: 3-18).

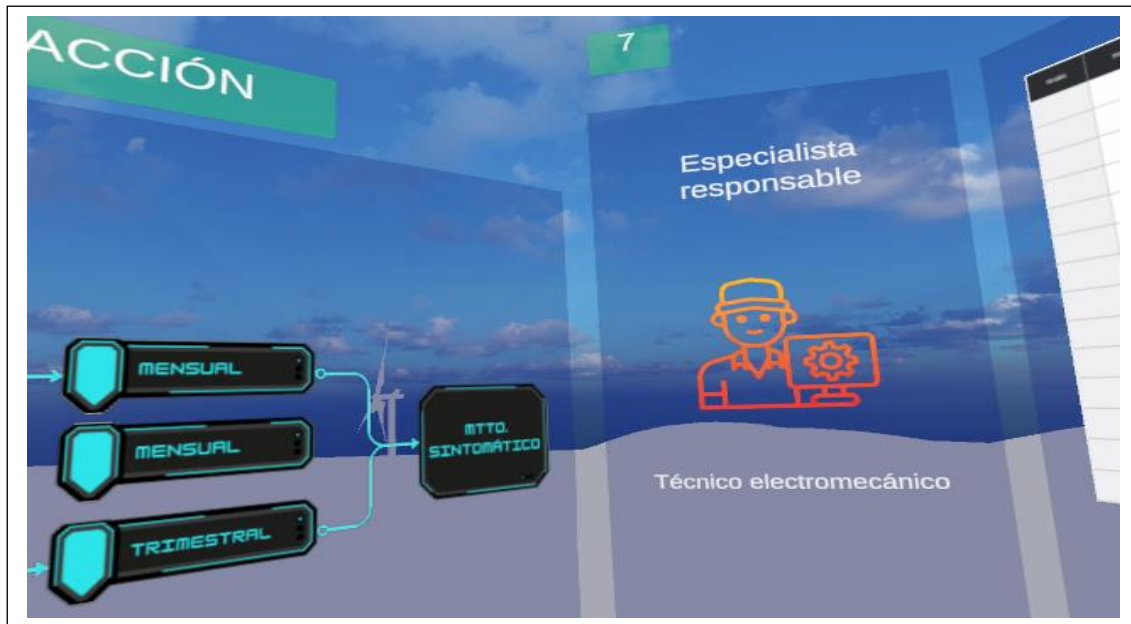


Figura 3-18: Escena AMEF, pestañas 7 en RVI

Fuente: Elaboración propia

Este conjunto ofrece una visión completa de las acciones necesarias para mantener en óptimas condiciones las aspas de la turbina eólica Vesta V100-2.0 [MW]. Además, se realizará un breve análisis del desarrollo de la aplicación parcial de la realidad virtual inmersiva creada para el parque eólico Valles de los Vientos y destinada a la turbina eólica Vestas V100-2.0 [MW].

A continuación, se destacarán los aspectos relevantes del proceso de creación de la aplicación, brindando información sobre cómo se ha adaptado esta tecnología de vanguardia al contexto específico del parque eólico y la turbina en cuestión. También se enfocará en futuras mejoras, particularmente con relación a los indicadores, para continuar optimizando el prototipo parcial. Entendiendo que esta tesis está orientada para hacer un caso de investigación y desarrolla con la finalidad de incorporar las hermanitas de gestión de mantenimiento a la industrial 4.0, específicamente a la realidad virtual inmersiva.

3.3.4. Análisis del prototipo parcial

El desarrollo de este prototipo parcial cumple con los objetivos de capacitar al usuario a través herramientas de realidad virtual inmersiva. Se emplea una metodología que determina los tipos de mantenimiento a llevar a cabo en activo físico, jerarquizar los equipos por su importancia y establecer un plan de mantenimiento preventivo para asignar los recursos, tal como se observar en el caso de estudio desarrollado para la turbina eólica Vestas V100-2.0 [MW], ver (Figura 319).



Figura 3-19: Utilización del aplicativo parcial

Fuente: Elaboración propia

RECOMENDACIONES

Después de desarrollar esta herramienta, se recomienda generar en el futuro el módulo de indicadores para evaluar la efectividad de los planes de mantenimiento. Estos indicadores mínimos recomendados se dividen en dos etapas:

Primera etapa: En esta etapa se definirán los indicadores básicos para una posible implementación al aerogenerador para el prototipo de simulación de realidad virtual. Estos serían:

- ✓ Frecuencia de fallos (confiabilidad).
- ✓ Tiempo medio para reparación (mantenibilidad).
- ✓ Tiempo medio hasta la falla (confiabilidad).
- ✓ Disponibilidad.

Esta primera etapa se puede ver una escena piloto, ver (Figura: 3-20).



Figura 3-20: Escena de indicadores

Fuente: Elaboración propia

Segunda etapa: A mediano plazo, como una mejora de indicadores, se introducirán los indicadores probabilísticos y de costos, que serán:

- ✓ Confiabilidad (probabilístico).
- ✓ Mantenibilidad (probabilístico).
- ✓ Coste por indisponibilidad por fallos (costos).

La finalidad del indicador de Coste por indisponibilidad por fallos (CIF) es traducir la confiabilidad y la mantenibilidad en términos económicos, proporcionando una representación clara y cuantitativa del impacto económico de las fallas en el equipo o sistema.

Con el fin de mejorar constantemente el proyecto, es fundamental abordar ciertos aspectos de funcionalidad del aplicativo. Por este motivo, se incluye una propuesta de actividades de mantenimiento y las horas de cada actividad en la tabla del plan de acción, ver (Tabla 2-17). Esta futura implementación tiene el propósito de aspirar a una potencial mejora en la implantación del software, analizando los costos de cada actividad de mantenimiento para generar un presupuesto anual y así compararlos con los riesgos cuantitativos de los modos de fallos físicos.

En un principio, el prototipo parcial de la matriz cualitativa está diseñado para ser utilizado en el proceso de adiestramiento, pero con la intención de más adelante convertirse en una herramienta que pueda recibir y compartir datos directos a un software de mantenimiento en el futuro. Esto significa la capacidad de calcular valores de riesgo económico a partir de parámetros e indicadores de mantenimiento.

A continuación, se analizarán las fortalezas y amenazas que involucran a este tipo de proyectos de realidad virtual inmersiva, ver (Tabla 3-4).

Fortalezas		Amenazas
Procesos de adiestramientos más eficientes		Limitación de realismos en la simulación
Adquirir parámetros de simulaciones de datos		Dependencia tecnológica
Comparar escenarios que permitan comprender el comportamiento del activo:		Baja fiabilidad para la precisión de los datos:
Determinar el diagnóstico y predicción de fallos		Software de mantenimiento
Estimación de la vida útil de los activos físicos		proceso de planificación
Rediseñar el activo o el sistema de control para adaptar condiciones de operación		Órdenes de trabajo

Tabla 3-4: Representación de las Fortalezas y Amenazas del Prototipo parcial

Fuente: Elaboración propia

Estos parámetros son el paso para el desarrollo de un gemelo digital, lo que brinda la posibilidad de ofrecer una herramienta innovadora para el futuro y además de potenciar aún más las cualidades del prototipo de realidad virtual inmersiva del aerogenerador.

CONCLUSIONES

En resumen, este prototipo parcial de realidad virtual inmersiva (RVI) tiene la capacidad de explicar de manera pedagógica una de las fallas comunes en el mantenimiento de aerogeneradores, específicamente del tipo Vesta V100 – 2.0 [MW], utilizando las técnicas del modelo gestión de mantenimiento (MGM), estructurando jerárquicamente los componentes del activo, determinando su mantenimiento preventivo y priorización de los recursos, mediante las fases 2 y 4 del modelo mencionado. Esta metodología se considera una herramienta esencial para instruir a futuros técnicos relacionados con los aerogeneradores.

Entendiendo que el futuro del proyecto es convertirse en un software de capacitación orientado al área de mantenimiento específicamente a un aerogenerador, en primera instancia el trabajo solo abarca un subsistema para finalizar el plan piloto, ver tablas (Anexo). Pero con la intención de potenciar el software a una etapa más madura y definitiva. Es por ello, que se desarrollara una tabla de costos asociados al software terminado, ver tablas (Anexo B). Se observará los costos estimados referente a los materiales y mano de obra, considerando todos los subsistemas a programar y diseñar, con sus respectivos modos de fallos. Entregando una herramienta que cumpla con la expectativa de un adiestramiento inmersivo por medio de la realidad virtual inmersiva (RVI) apta para aprender y analizar todos los subsistemas que abarcan estos tipos de aerogeneradores.

El objetivo del simulador de es brindar soporte a los sistemas existentes de mantenimiento de aerogeneradores, contribuyendo a los cambios positivos experimentados en la revolución industrial 4.0. Su propósito es mostrar las capacidades de prevención de accidentes laborales, especialmente en la industria de las energías renovables, que es relativamente nueva y susceptible a este tipo de incidentes. Al potencial las capacidades humanas a través de la capacitación inmersiva, la tecnología se pone al servicio del usuario para mejorar sus habilidades de aprendizaje, lo que se alinea con la visión de la industria 5.0, que sitúa al ser humano en el centro de la tecnología, promoviendo la sostenibilidad y a la vez resiliente al

compromiso de ayudar al humano en sus tareas. Un ejemplo de esto es el proyecto *Augmented Workers*, una evolución de la realidad virtual y aumentada, desarrollado en Japón por la empresa *Railway Compay* en abril de 2022 para tareas de mantenimiento, (Galar, 2024).

Es fundamental comprender que este trabajo busca contribuir al avance de la revolución industrial mediante el impulso de las energías renovables. Busca afrontar el desafío de la transición energética, abandonando las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles, al tiempo que ubica la tecnología como un aliado enriquecedor para el ser humano.

BIBLIOGRAFIA

- 17359, N. I. (Ene 2018). *Monitoreo y Diagnóstico de condición de máquinas Directrices generales*.
- 55000, I. (2014). *Gestión de activos - Aspectos generales, principios y terminología*.
- Enel. (2013). *Enel Chile*. Obtenido de Parque Eólico Valle de los Vientos:
<https://www.enel.cl/es/conoce-enel/nuestras-centrales/parque-eolico-valle-de-los-vientos.html>
- Enel. (2018). *Guía Chile energía*. Obtenido de [https://www.guiachileenergia.cl/parque-eolico-valle-de-los-vientos-ltda/#:~:text=El%20proyecto%20tiene%20una%20capacidad,del%20Norte%20Grande%20\(SING\)](https://www.guiachileenergia.cl/parque-eolico-valle-de-los-vientos-ltda/#:~:text=El%20proyecto%20tiene%20una%20capacidad,del%20Norte%20Grande%20(SING)).
- Entel. (2022). *CE comunidad empresas*. Obtenido de Realidad virtual y aumentada: diferentes usos para las empresas: <https://ce.entel.cl/articulos/realidad-virtual-aumentada-empresas/>
- Galar, D. (2024). *Prof Diego Galar Web 2 Marzo UTFSM Recording 1920x1080*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=tOSc8CZpqFo&t=3659s>
- Inmaculada, A.-D. (2018). *La tecnología móvil de Realidad Virtual en educación: una revisión del estado de la literatura científica*. Obtenido de
file:///C:/Users/jose_/Downloads/ojsadmin,+06_Aznar_Rodriguez_Rodriguez_10139.pdf
- Inmersys. (2023). *Cómo usar Realidad Virtual para capacitar a tu equipo*. Obtenido de
<https://blog.inmersys.com/como-usar-realidad-virtual-para-capacitar-a-tu-equipo>
- Meta. (2023). *Requisitos para usar Meta Quest Link*. Obtenido de www.meta.com
- Muñoz, A. (Abril de 2021). *ResearchGate*. Obtenido de Realidad virtual, aprendizaje inmersivo y realidad aumentada: Casos de Estudio en Carreras de Ingeniería:
https://www.researchgate.net/publication/350452789_Realidad_virtual_aprendizaje_inmersivo_y_realidad_aumentada_Casos_de_Estudio_en_Carreras_de_Ingenieria
- Parra, C. (2021). *ResearchGate*. Obtenido de METODOLOGÍA BÁSICA DE ANÁLISIS DE RIESGO PARA EVALUAR LA CRITICIDAD DE ACTIVOS INDUSTRIALES. CASO DE ESTUDIO: LÍNEA DE MANUFACTURA DE ENVASES BIODEGRADABLES:
https://www.researchgate.net/publication/348394507_METODOLOGIA_BASICA_DE_ANALISIS_DE_RIESGO_PARA_EVALUAR_LA_CRITICIDAD_DE_ACTIVOS_INDUSTRIALES_CASO_DE_ESTUDIO_LINEA_DE_MANUFACTURA_DE_ENVASES_BIODEGRADABLES
- Paz, J. (Marzo de 2023). *El Tiempo*. Obtenido de Último abrazo: el adiós de dos ingenieros antes de morir que conmovió al mundo: <https://www.eltiempo.com/cultura/gente/el-ultimo-abrazo-historia-de-dos-ingenieros-que-murieron-calcinados-748842>

- Roca, R. (2017). *La realidad virtual despega en el sector de las renovables*. Obtenido de elperiodicodelaenergia.com: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-realidad-virtual-despega-en-el-sector-de-las-renovables/>
- Tecnalia. (2023). Obtenido de <https://www.tecnalia.com/>
- TurboSquid. (2023). *Vestas Modelos de 3D*. Obtenido de www.TurboSquid.com
- UNE-EN. (2008). *Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistema. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMEF)*. Obtenido de AENOR: <https://www.aenor.es>
- Vestas. (2013). *General specification V100-1.8/2.0 [MW], 50 [Hz] VCS. Vestas Wind Systems A/S*. Obtenido de <https://7www.vestas.com>
- Zuñiga, P. (2023). *Metso*. Obtenido de Soluciones en Realidad Virtual (VR): la irrupción del Metaverso en la minería: <https://www.metso.com/es/informacion/blog/mineria-y-refinacion-de-metales/soluciones-en-realidad-virtual-vr-la-irrupcion-del-metaverso-en-la-mineria/>

ANEXO A

En este Anexo se observará las tablas relacionadas a los Costos asociados al desarrollo del prototipo parcial de realidad virtual inmersiva (RVI), (considerando solo un subsistema):

Profesional	Cantidad	sueldo	V. Unitario
Alumno	1	\$ 1.056.890	\$ 5.872

Tabla 3-6: Costos asociados a la mano de obra

Fuente: Elaboración propia

PRESUPUESTO GENERAL						
Mano de obra						
Partida	Subsistema	Unidad	Cantidad horas	Precio Unitario	Precios	Total
P1	Palas	hrs	180	\$ 5.872	\$ 1.056.890	\$ 1.056.890
Material						
Ítem	Subsistema	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precios	Total
1	Oculus Quest 2 - Lentes de Realidad Virtual	und	1	\$ 409.052	\$ 409.052	\$ 1.420.348
2	Base Cooler (enfriador computador)	und	1	\$ 20.000	\$ 20.000	
3	Cable Oculus Link	und	1	\$ 16.990	\$ 16.990	
4	Notebook Victus by HP 8 [Gb] Invidia Geforce RTX	und	1	\$ 749.990	\$ 749.991	
5	Modelo en 3D de Turbina eólica	und	1	\$ 224.315	\$ 224.315	
SUB-TOTAL						\$ 1.420.348
GASTOS GENERALES					20%	\$ 284.070
UTILIDADES					15%	\$ 213.052
TOTAL NETO						\$ 1.917.470
IVA					19%	\$ 364.319
TOTAL						\$ 2.281.789

Tabla 3-7: Costos asociados a la implementación parcial de Realidad Virtual

Fuente: Elaboración propia

ANEXO B

En este Anexo se observan los costos asociados a la estimación del proyecto de realidad virtual inmersiva (RVI), ya finalizado (considerando todos los subsistemas):

Profesional	Cantidad	sueldo	V. Unitario
Ing. Mantenimiento	1	\$ 1.120.560	\$ 6.225
Programador	1	\$ 1.102.450	\$ 6.125
Técnico	1	\$ 845.321	\$ 4.696
Total			\$ 17.046

Tabla 3-8: Costos asociados a la mano de obra

Fuente: Elaboración propia

PRESUPUESTO GENERAL						
Mano de obra						
Partida	Subsistema	Unidad	Cantidad horas	Precio Unitario	Precios	Total
P1	Palas	hrs	27	\$ 17.046	\$ 460.250	\$ 14.421.156
P2	Control y comunicación	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P3	Cuadro eléctrico	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P4	Transformador	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P5	Convertidor de frecuencia	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P6	Generador eléctrico	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P7	Torre	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P8	Yaw	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P9	Anemómetro y Veleta	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P10	Transmisión	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P11	Conjunto de eje principal	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P12	Bujes	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P13	Pitch	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
P14	Sistema hidráulico	hrs	63	\$ 17.046	\$ 1.073.916	
Material						
Ítem	Subsistema	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precios	Total
1	Oculus Quest 2 - Lentes de Realidad Virtual	und	3	\$ 409.052	\$ 1.227.156	\$ 2.278.454
2	Base Cooler (enfriador computador)	und	3	\$ 20.000	\$ 60.000	
3	Cable Oculus Link	und	1	\$ 16.990	\$ 16.990	
4	Notebook Victus by HP 8 [Gb] Invidia Geforce RTX	und	3	\$ 749.990	\$ 749.993	
5	Modelo en 3D de Turbina eólica	und	1	\$ 224.315	\$ 224.315	
SUB-TOTAL						\$16.699.610
GASTOS GENERALES					20%	\$ 3.339.922
UTILIDADES					15%	\$ 2.504.941
TOTAL NETO						\$22.544.473
IVA					19%	\$ 4.283.450
TOTAL						\$26.827.923

Tabla 3-9: Costos asociados a una estimación del proyecto de Realidad Virtual terminado

Fuente: Elaboración propia