

CMC COLOMBIA 2026



Sesión

SPARK

1

1



SPARK

SESIÓN 9



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA

3^a
EDICIÓN



FMECA-VR 0.1: formación técnica en confiabilidad mediante simulación inmersiva en entornos virtuales.

Caso de Estudio: Parque Eólico Valle de los Vientos, Chile

Carlos Parra

2

2

Mensaje central para el CMC

El desafío

Activos críticos más complejos
Brecha entre conocimiento experto y ejecución en terreno
Entrenamiento tradicional con alto costo, riesgo y baja repetibilidad

La propuesta

Integrar QRCM + FMECA + VR
Transformar metodología de confiabilidad en experiencia inmersiva
Entrenar decisiones de mantenimiento en un entorno seguro

El impacto

Menos errores humanos
Mejor comprensión de modos de falla
Mayor velocidad de transferencia de conocimiento
Base para gemelo digital y analítica RAM

Video:

<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7200352283866349568/>

March 2026


 woodhouse
an RSK company

3

Problema industrial: formación técnica para activos críticos

En mantenimiento, la mayoría de los errores no se originan solo por falta de información, sino por falta de comprensión del contexto operacional.

Los técnicos deben interpretar fallas, criticidad, riesgos y estrategias de mantenimiento bajo presión operacional.

La formación tradicional no siempre permite simular fallas complejas, consecuencias y toma de decisiones sin exponer personas o activos.



 woodhouse
an RSK company

4

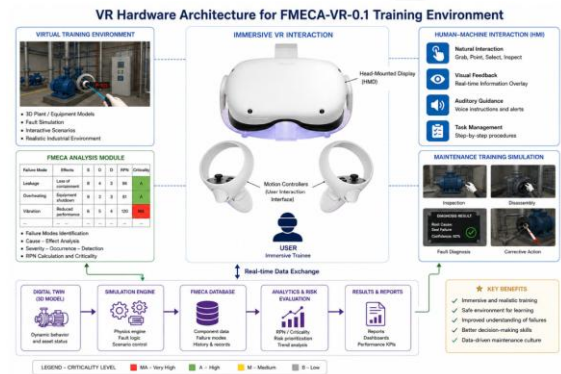
Objetivo y contribución del trabajo

Desarrollar un prototipo FMECA–VR 0.1 para entrenamiento técnico inmersivo en mantenimiento de aerogeneradores.

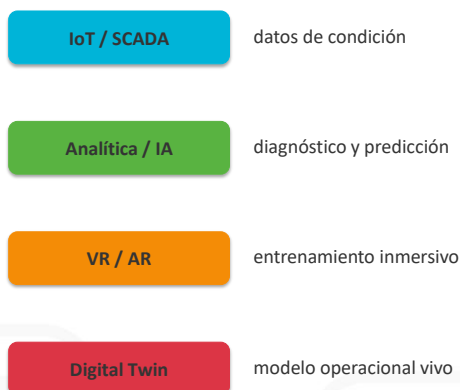
Contribución

Conecta el Modelo de Gestión del Mantenimiento con herramientas de confiabilidad y tecnologías de Metaverso.

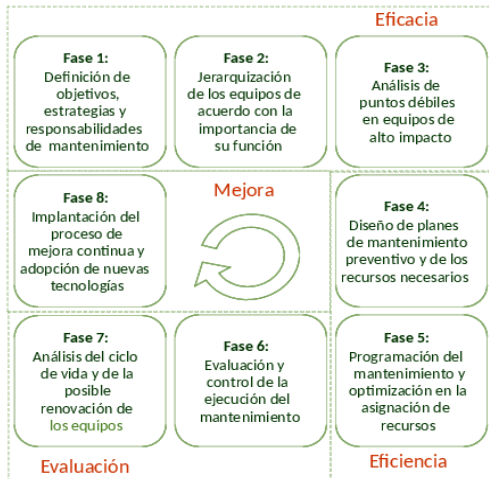
Traslada QRCM y FMECA desde tablas tradicionales hacia una experiencia interactiva de aprendizaje.



Marco tecnológico: Maintenance 4.0



Base metodológica: Modelo de Gestión del Mantenimiento (MGM).



El MGM ordena la gestión desde la estrategia hasta la mejora continua.

FMECA–VR se posiciona especialmente en las fases 2, 4, 5 y 8.

La propuesta no reemplaza el método: lo convierte en experiencia de aprendizaje técnico.

Eficacia → jerarquizar y analizar activos críticos

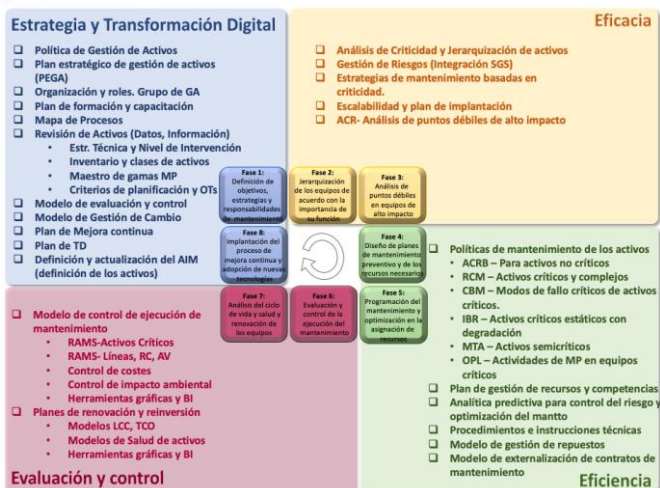
Eficiencia → diseñar y optimizar mantenimiento

Mejora → incorporar nuevas tecnologías

Figura original del artículo: modelo de 8 fases de INGEMAN

7

Conexión práctica: gestión de mantenimiento + transformación digital



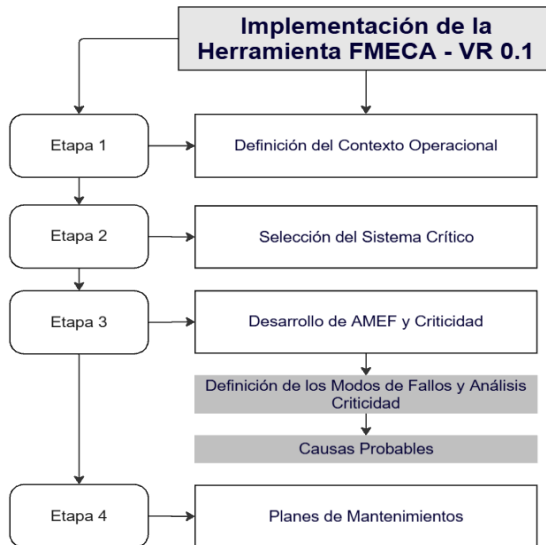
La digitalización no debe entrar de forma aislada: debe responder a brechas reales de gestión.

El artículo conecta estrategia, criticidad, planes de mantenimiento, indicadores y tecnologías 4.0.

FMECA–VR se propone como puente entre métodos clásicos y entrenamiento digital.

8

Procedimiento general FMECA–VR 0.1



- 1 Contexto operacional
- 2 Selección del sistema crítico
- 3 AMEF/FMECA y criticidad
- 4 Planes de mantenimiento
- 5 Entrenamiento VR

Caso de estudio: Parque Eólico Valle de los Vientos - Chile

45
aerogeneradores

90 MW
capacidad instalada

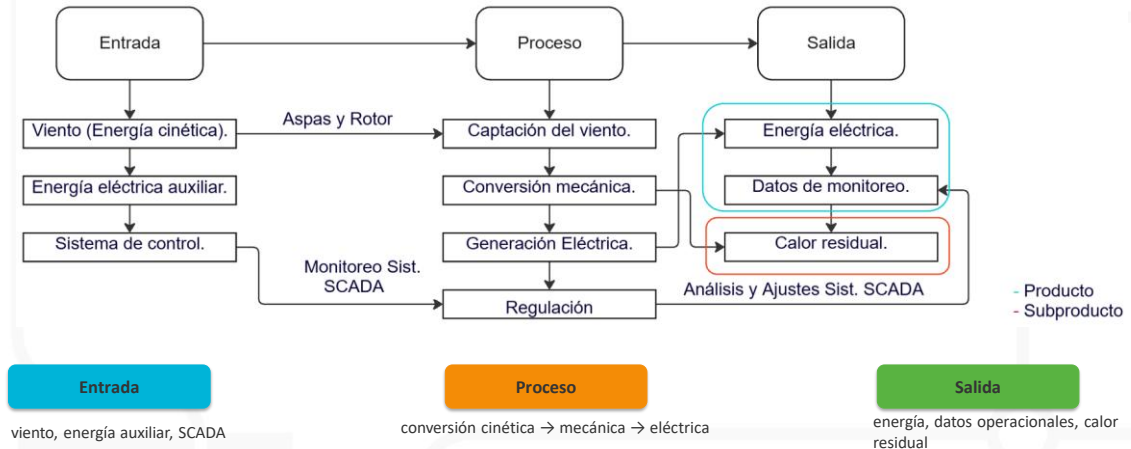
V100
VESTAS · 2 MW

Calama
ambiente desértico

El caso permite demostrar la aplicación de FMECA–VR en activos de alto impacto: operación remota, ambiente exigente, altos costos de indisponibilidad y necesidad de formación especializada.



Contexto operacional: Diagrama Entrada-Proceso-Salida

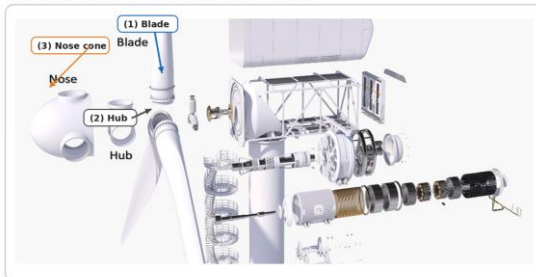


11

Subsistemas críticos del aerogenerador

Blade Subsystem Components

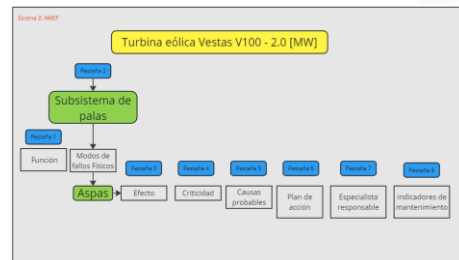
Maintainable items selected for FMECA-based failure mode identification



Source image extracted and annotated for manuscript presentation.

La estructura funcional permite ubicar los modos de falla en el nivel correcto de análisis.

El nivel de detalle debe permitir seleccionar tareas de mantenimiento ejecutables.



Subsistemas clave: palas, eje principal, multiplicadora, generador DFIG, convertidor, transformador, cuadro eléctrico y sistema yaw.

12

QRCM: Matriz Cualitativa de Criticidad basada en Riesgo

Riesgo = Frecuencia de fallos ×
Consecuencia

Consecuencia =
Seguridad/Ambiente + Producción
+ Costos directos

Permite priorizar subsistemas y
modos de falla para asignar
recursos de mantenimiento.

Qualitative Risk Criticality Matrix (MCCR)

Failure Frequency	Consequence of Failure				
	Very Low (1)	Low (2)	Medium (3)	High (4)	Very High (5)
Very High (5)	A	A	MA	MA	MA
High (4)	M	M	A	A	MA
Medium (3)	M	M	M	A	MA
Low (2)	B	B	B	M	A
Very Low (1)	B	B	B	M	A

Increasing Frequency ↑

Increasing Consequence →

MA Very High: Requires immediate attention and action.
A High: Requires priority management.
M Medium: Requires planned management.
B Low: Requires routine management.

Note: The matrix combines qualitative levels of Failure Frequency (Y-axis) and Consequence of Failure (X-axis) to determine the overall risk criticality level.

B: baja · M: media · A: alta · MA: muy alta

13

FMECA: de la falla física a la estrategia de mantenimiento

Función

¿Qué debe hacer el subsistema?

Falla funcional

¿Cómo deja de cumplir su función?

Modo de falla

Evento físico mantenible

Efecto

Consecuencia operacional

Criticidad

Riesgo del modo de falla

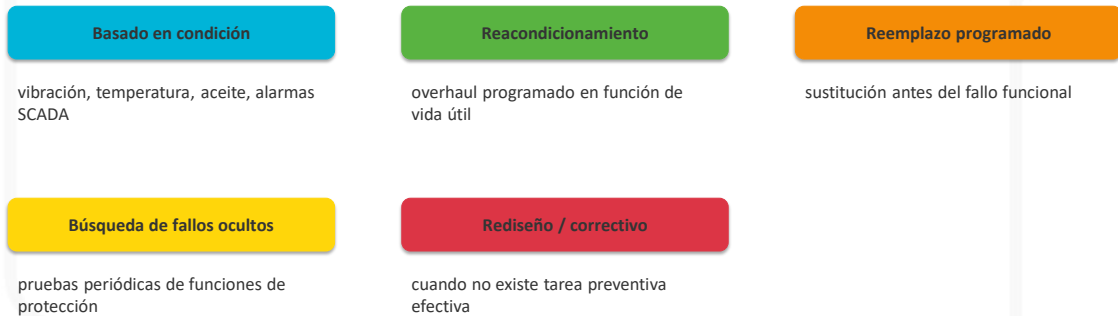
Estrategia

Tarea preventiva/correctiva

La innovación del trabajo consiste en trasladar esta lógica a una interfaz inmersiva donde el usuario explora componentes, criticidad y decisiones de mantenimiento.

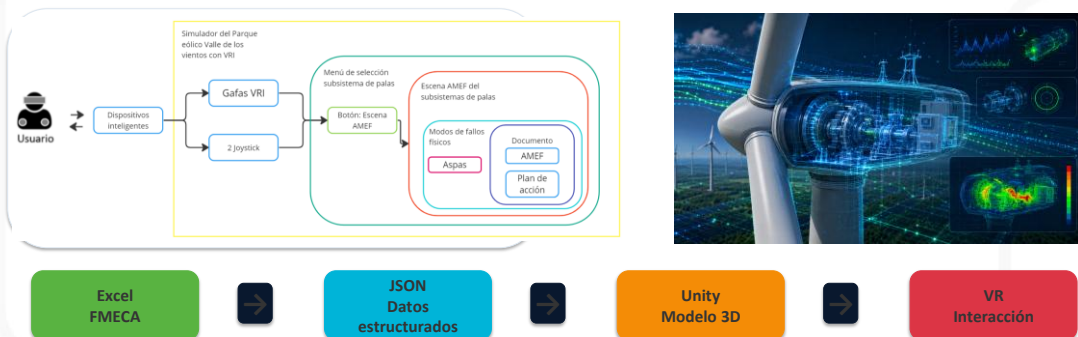
14

Estrategias de mantenimiento integradas en la herramienta



15

Arquitectura digital: de la planilla técnica al entorno VR



Este flujo permite convertir información de confiabilidad en objetos interactivos: componente, modo de falla, criticidad, causa probable y tarea de mantenimiento.

16

Prototipo FMECA-VR 0.1: navegación e interacción



ESCENA 1: MENÚ INICIO

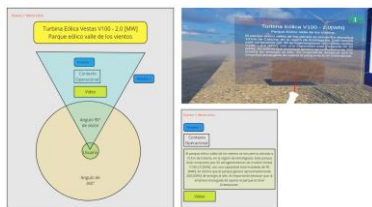
Plataforma inmersiva de entrenamiento en VR: contexto operacional y acceso al módulo FMECA

1 Vista general del parque eólico OPERADOR - Iniciar - Entrenamiento - FMECA - Recursos - Configuración - Salir Vista panorámica del parque eólico. Permite comprender el entorno operacional y acceder a las distintas opciones de la plataforma.	2 Detalle aerogenerador Vista detallada del aerogenerador. Permite observar de cerca los componentes principales y su contexto físico.	3 Información técnica de la turbina INFORMACIÓN TÉCNICA Turbina Eólica V100 - 2.0MW Pala eólica de eje horizontal Potencia nominal: 2.0 MW Diámetro del rotor: 100 m Altura del buje: 80 m Velocidad de corte: 25 m/s Accede a la información técnica completa y a los procedimientos de mantenimiento para garantizar la seguridad y la fiabilidad de la turbina. Acceso a los datos técnicos principales de la turbina y a los procedimientos de mantenimiento asociados.	4 Criticidad y acceso al módulo FMECA Subsistema de Palas Matriz de Riesgos 1. Selecciona el subsistema que deseas analizar. 2. Revisa los modos de fallo y su criticidad. 3. Evalúa Severidad, Ocurrencia y Detección. 4. Consulta los modos recomendados. Presiona PLAY y usa los botones para cargar las otras opciones. ESCENA / FMECA Evalúa la criticidad de los subsistemas y accede al módulo FMECA para realizar el análisis detallado de fallos y riesgos.	5 Vistas laterales de aproximación Vistas laterales que permiten una aproximación segura al aerogenerador y facilitan la orientación en el entorno.
1 VISTA GENERAL DEL PARQUE EÓLICO Vista panorámica del parque eólico. Permite comprender el entorno operacional y acceder a las distintas opciones de la plataforma: - Iniciar entrenamiento - Módulo FMECA - Recursos de apoyo - Configuración de usuario - Salir de la aplicación	2 DETALLE AEROGENERADOR Vista detallada del aerogenerador. Permite observar de cerca los componentes principales (pala, góndola, buje, torre) y su contexto físico dentro del parque eólico.	3 INFORMACIÓN TÉCNICA DE LA TURBINA Acceso a los datos técnicos principales de la turbina: - Potencia nominal - Diámetro del rotor - Altura del buje - Velocidad de corte Incluye procedimientos de mantenimiento para garantizar una operación segura y fiable.	4 CRITICIDAD Y ACCESO AL MÓDULO FMECA Permite seleccionar un subsistema y evaluar su criticidad mediante la matriz de riesgos (Severidad vs. Ocurrencia). - Revisión de modos de fallo - Evaluación de Severidad, Ocurrencia y Detección - Consulta de recomendados Accede al módulo FMECA para el análisis detallado de fallos y riesgos.	5 VISTAS LATERALES DE APROXIMACIÓN Vistas laterales que permiten una aproximación segura al aerogenerador desde diferentes ángulos. Facilitan la orientación y el reconocimiento del entorno operativo.

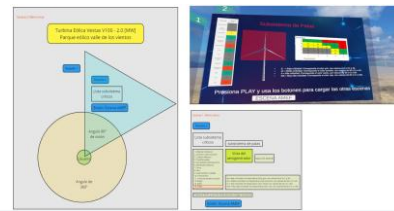
Imágenes originales del prototipo + visualización conceptual VR

17

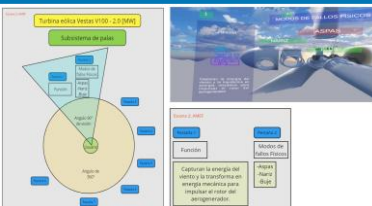
Secuencia de aprendizaje propuesta



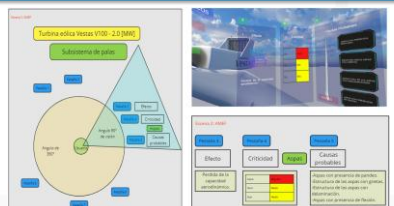
1. Reconocer el contexto operacional



2. Seleccionar subsistema crítico



3. Analizar modos de falla y criticidad



4. Definir estrategia de mantenimiento

18

Impacto esperado en capacitación y confiabilidad

Aprendizaje

mayor retención visual y práctica

Seguridad

simulación sin exposición al riesgo

Confiabilidad

mejor comprensión de modos de falla

Estandarización

misma lógica técnica para todos los usuarios

Escalabilidad

adaptable a minería, energía, manufactura y petróleo

Relevancia para LATAM y el Congreso CMC

LATAM concentra industrias intensivas en activos: minería, energía, petróleo, celulosa, transporte y manufactura. La brecha de competencias técnicas es un factor crítico para seguridad, disponibilidad y costos. FMECA–VR 0.1 propone una vía concreta para transferir conocimiento experto y formar técnicos bajo estándares de confiabilidad.



Hoja de ruta: de FMECA–VR 0.1 al Gemelo Digital



entrenamiento
inmersivo

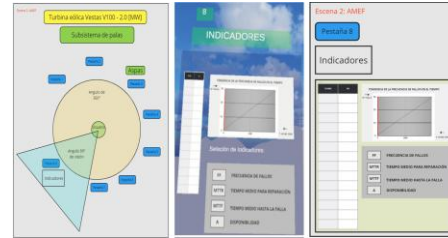
datos SCADA/IoT

indicadores RAM
online

gemelo digital
predictivo

decisiones asistidas
por IA

La versión presentada es un prototipo formativo. El valor futuro está en conectar el entrenamiento con datos reales y desarrollar simulaciones RAM - online y toma de decisiones proactivas.



Consideraciones finales

FMECA–VR 0.1 integra métodos clásicos de confiabilidad con tecnologías inmersivas de la Industria 4.0. La herramienta convierte criticidad, modos de falla y estrategias de mantenimiento en una experiencia visual e interactiva. El caso VESTAS V100 demuestra la aplicabilidad en activos renovables críticos.

Principales aportes:

- Integración de FMECA + VR + Metaverso Industrial
- Entrenamiento inmersivo en confiabilidad
- Aplicación en aerogeneradores VESTAS V100
- Enfoque Maintenance 4.0 y Asset Management
- Plataforma escalable hacia Digital Twins



Mensaje final: digitalizar el entrenamiento técnico también es gestionar confiabilidad

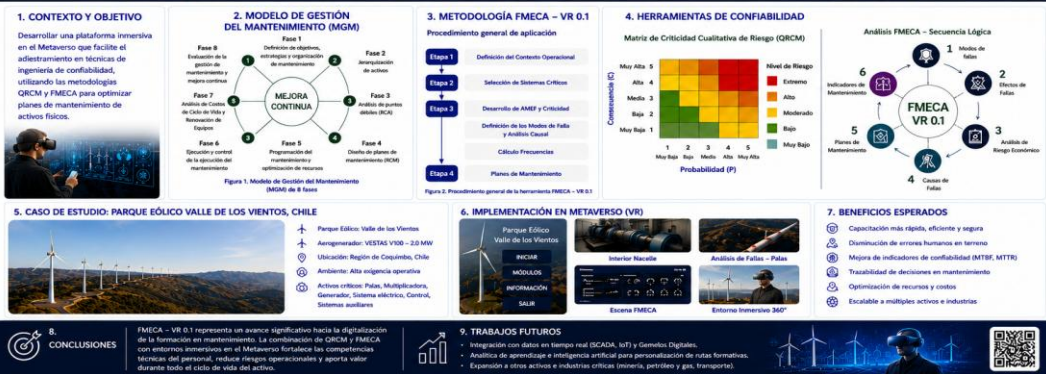
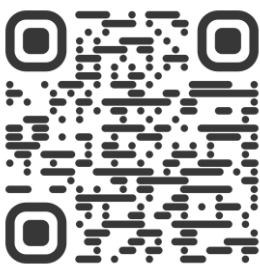
CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDADCOLOMBIA
2026UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍAUNIVERSIDAD
DE SEVILLADUBLIN TECHNOLOGICAL
UNIVERSITY DUBLINNueva Publicación Internacional. **Applied Sciences (MDPI) – 2026:**<https://www.mdpi.com/2076-3417/16/10/4909>**Development of an Immersive VR-Based Training Platform Integrating****FMECA for Wind Turbine Maintenance: FMECA-VR-0.1 Prototype**Carlos Parra 1,*¹, José Ognio 1, Pablo Duque 1, Félix Pizarro 1, Andrés Aránguiz 1, Vicente González-Prida2,*², Adolfo Crespo 2 and Jorge Parra 3

1 Departamento de Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Av. Federico Sta. María 6090, Chile

2 Department of Industrial Management, University of Seville, 41092 Seville, Spain

3 School of Electrical and Electronic Engineering, Technological University Dublin, D24 FKT9 Dublin, Ireland

*Authors to whom correspondence should be addressed.

Entorno seguro, Inmersivo
y realista para el aprendizaje
prácticoContribuye a la transformación
digital del mantenimiento
(Maintenance 4.0)woodhouse
an RSK company**SESIÓN 9**ESCANEA EL
CÓDIGO QRRESPONDE UNA
BREVE ENCUESTACONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA3^a
EDICIÓN**¡GRACIAS!****Carlos Parra**