

Guía para el diseño de un plan de mantenimiento eléctrico basado en confiabilidad para un sistema de bombeo mecánico en un levantamiento artificial de superficie LAS

Daniel Felipe Castro Verdooren y Oscar Julián Londoño Pabón

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingenieros Electricistas

Director

MBA. Rolando Andrés Rincón Saravia

Tutor (Externo)

MSc. Alberth Paba

Codirector (es)

Phd. Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2025

Tabla de contenido

Introducción	11
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Términos y definiciones	15
2.1 Indicadores KPI	15
2.1.1 <i>Confiabilidad (Reliability)</i>	16
2.1.2 <i>Disponibilidad (Availability)</i>	16
2.1.3 <i>Mantenibilidad (Maintenability)</i>	17
2.1.4 <i>Tiempo medio entre fallas (MTBF - Mean Time Between Failures)</i>	17
2.1.5 <i>Tiempo medio de reparación (MTTR – Mean Time To Repair)</i>	18
2.1.6 <i>Tiempo medio transcurrido hasta la falla (MTTF – Mean Time To Failure)</i>	19
3. Modos de falla	21
3.1 Identificar los modos de falla	21
3.2 Estableciendo cual es el significado de “probable”	22
3.3 Niveles de causalidad	22
3.3.1 <i>Causas de la falla</i>	23
3.3.2 <i>Causas raíz</i>	23
3.4 Fuentes de información de los modos de falla	23
3.5 Tipos de modos de falla	24
3.5.1 <i>Modos de falla funcionales</i>	25
3.5.2 <i>Modos de falla parciales</i>	25

3.5.3 Modos de falla intermitentes	25
3.5.4 <i>Modos de falla catastróficos</i>	25
3.5.5 <i>Modos de falla degradativos</i>	25
4. Efectos de falla	26
4.1 Efectos de falla económicos	27
4.2 Efectos de falla de seguridad	27
4.3 Efectos de falla operacionales	27
4.4 Efectos de falla ambientales	27
5. Consecuencia de fallas	28
5.1 Fallas evidentes y ocultas	28
5.1.1 <i>Fallas evidentes de las funciones protectoras</i>	29
5.1.2 <i>Funciones protectoras cuya falla no es evidente</i>	30
5.2 Consecuencias en la seguridad, el ambiente, operacionales y no operacionales	32
5.2.1 <i>Consecuencias en la seguridad</i>	32
5.2.2 <i>Consecuencias ambientales</i>	32
5.2.3 <i>Consecuencias operacionales</i>	33
5.2.4 <i>Consecuencias no operacionales</i>	33
6. Políticas de manejo de fallas	34
6.1 Relación entre longevidad y falla	35
6.2 Técnicamente factible y vale la pena hacerlo	36
6.3 Efectividad de costo	36
6.4 Selección de las políticas de manejo de fallas	36
6.4.1 <i>Mantenimiento Preventivo (Preventive Maintenance)</i>	37
6.4.2 <i>Mantenimiento Predictivo (Predictive Maintenance)</i>	37

6.4.3 Mantenimiento Correctivo (Corrective Maintenance)	37
6.4.4 <i>Mantenimiento Proactivo (Proactive Maintenance)</i>	38
6.4.5 <i>Operar hasta fallar (Operate to failure)</i>	38
7. Herramienta de modos de falla, efectos y análisis de criticidad (FMECA)	38
7.1 ¿Cómo se usa la herramienta FMECA?	39
7.1.1 <i>Definir el sistema y sus componentes</i>	39
7.1.2 <i>Identificar modos de falla</i>	39
7.1.3 <i>Determinar efectos de falla</i>	39
7.1.4 <i>Evaluar la criticidad</i>	39
7.1.5 <i>Priorizar modos de falla</i>	40
7.1.6 <i>Desarrollar estrategias de mantenimiento</i>	40
7.1.7 <i>Implementar y revisar</i>	40
8. Estructura de la guía de mantenimiento	40
8.1 Introducción	40
8.2 Levantamiento de campo	40
8.3 Definición de funciones	41
8.4 FMECA	41
8.5 Tipo de tareas	41
8.6 Asignación de tareas	41
8. Descripción de hoja de ruta	42
9. Conclusiones	44
Referencias bibliográficas	45
Apéndices	45

Lista de figuras

- Figura 1.** *Curva de la bañera para la tasa de peligro de un ítem mantenible, tomada de la norma ISO 14224, sección 3.1.2* 20
- Figura 2.** *Falla evidente de una función protectora, tomada de la norma SAE-JA1012, sección 10.1.1.1, 2002.* 30
- Figura 3.** *Falla oculta de una función protectora, tomada de la norma SAE-JA1012, sección 10.1.1.2, 2002* 31
- Figura 4.** *Clasificación de las consecuencias de falla, tomada de la norma SAE-JA1012, Tabla C.2 ANEXO C, 2002* 34
- Figura 5.** *Seis patrones de falla, tomada de la norma SAE-JA1012, sección 11.1, 2002.* 35

Glosario

AIR: Lectura anormal en instrumento

FLP: Falla en sistema de protección contra rayos

FOF: Error en frecuencia de salida

FOV: Error en el voltaje de salida

FRO: Falla de rotación

FTC: Falla en cierre bajo demanda

FTF: Falla en funcionamiento bajo demanda

FTI: Falla de funcionamiento previsto

FTO: Falla en abrir bajo demanda

FTR: Falla de regulación

FTS: Falla en el arranque bajo demanda

HIO: Alta producción

LBP: Baja presión de suministro de aceite

LOO: Baja producción

NOI: Ruido anormal

OHE: Sobrecalentamiento

PLU: Taponamiento/atascamiento

STD: Deficiencia estructural

UNK: Desconocido

UST: Parada esporádica

VIB: Vibración

Resumen

Título: Guía para el diseño de un plan de mantenimiento eléctrico basado en confiabilidad para un sistema de bombeo mecánico en un levantamiento artificial de superficie LAS.*

Autor (es): Daniel Felipe Castro Verdooren y Oscar Julián Londoño Pabón**

Palabras Clave: Diseño, Mantenimiento, Confiabilidad, Bombeo Mecánico.

Descripción

El proyecto de grado "Guía para el Diseño de un Plan de Mantenimiento Eléctrico Basado en Confiabilidad para un Sistema de Bombeo Mecánico en un Levantamiento Artificial de Superficie (LAS)" tiene como objetivo crear una guía práctica que ayude a diseñar planes de mantenimiento eléctrico utilizando la metodología RCM. En el entorno industrial actual, el mantenimiento eléctrico es fundamental para la competitividad y eficiencia operativa. La Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander busca satisfacer las demandas de la industria, especialmente en el diseño de planes de mantenimiento efectivos para sistemas de bombeo mecánico en levantamientos artificiales de superficie. Este proyecto pretende mejorar la formación de los estudiantes, proporcionándoles herramientas y conocimientos prácticos para enfrentar desafíos reales en el mantenimiento eléctrico. Los objetivos específicos incluyen estudiar la metodología RCM, estructurar el contenido de la guía según normas y directrices relevantes (ISO 14224, SAE-JA1011, SAE-JA1012), y diseñar una guía detallada con procedimientos paso a paso para implementar planes de mantenimiento. Al abordar la falta de formación específica en mantenimiento eléctrico, este proyecto contribuye a preparar mejor a los futuros ingenieros y optimizar la operación de sistemas industriales complejos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia. Magister en dirección de empresas MBA. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Doctor en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Guide for the design of a reliability-based electrical maintenance plan for a mechanical pumping system in an artificial surface lift LAS.*

Author (s): Daniel Felipe Castro Verdooren y Oscar Julián Londoño Pabón**

Key Words: Design, Maintenance, Reliability, Mechanical Pumping.

Description

The thesis project "Guide for the Design of a Reliability Based Electrical Maintenance Plan for a Mechanical Pumping System in an Artificial Surface Lift (LAS)" aims to provide a practical guide for the design of electrical maintenance plans using the RCM methodology. In today's industrial environment, electrical maintenance is fundamental to competitiveness and operational efficiency. The School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications (E3T) of the Universidad Industrial de Santander seeks to meet the needs of industry, especially in the design of effective maintenance plans for mechanical pumping systems in artificial surface lifts. This project aims to improve the training of students, providing them with tools and practical knowledge to face real challenges in electrical maintenance. Specific objectives include studying the RCM methodology, structuring the content of the guide according to relevant standards and guidelines (ISO 14224, SAE-JA1011, SAE-JA1012), and designing a detailed guide with step-by-step procedures for implementing maintenance plans. By addressing the lack of specific training in electrical maintenance, this project will help to better prepare future engineers and optimize the operation of complex industrial systems.

* Degree Thesis

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia. Electrical Engineering. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga. PhD in Electrical Engineering.

Introducción

En el dinámico entorno industrial actual, donde la competitividad y la eficiencia son imperativos, el mantenimiento eléctrico emerge como un pilar fundamental para el éxito operativo. Sin embargo, la complejidad de los sistemas modernos demanda un enfoque más riguroso y estructurado en la gestión del mantenimiento. En este contexto, la Metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) se erige como un enfoque clave para abordar los desafíos del mantenimiento eléctrico de manera efectiva.

La metodología RCM ofrece un marco sólido y detallado para el diseño de planes de mantenimiento basados en la confiabilidad, centrándose en la identificación de las actividades críticas necesarias para garantizar la operación confiable de los sistemas. Es en esta convergencia entre la demanda de la industria y la metodología RCM donde surge la necesidad de desarrollar competencias específicas en diseño de planes de mantenimiento eléctrico basados en confiabilidad.

El programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) de la UIS debe estar a la vanguardia para satisfacer las demandas de la industria, y una de esas demandas es la capacidad de diseñar planes de mantenimiento eléctrico efectivos para sistemas de bombeo mecánico en levantamientos artificiales de superficie (LAS). Sin embargo, la verdadera necesidad radica en equipar a nuestros estudiantes con las competencias necesarias para aplicar la metodología RCM de manera efectiva en este contexto particular.

Esta propuesta busca complementar la formación de profesionales en ingeniería eléctrica, mejorando la confiabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos industriales y, proporcionar una herramienta práctica para abordar los desafíos del mantenimiento eléctrico en sistemas complejos. Por lo tanto, el presente proyecto propone desarrollar una guía que no solo transmita conocimientos

teóricos sobre la metodología RCM, sino que también proporcione una experiencia práctica y significativa para preparar a los estudiantes para los desafíos reales del mantenimiento eléctrico en sistemas complejos. Al identificar las actividades críticas necesarias para garantizar la operación confiable de los sistemas, la guía también contribuirá a optimizar los recursos de mantenimiento, lo que podría resultar en ahorros significativos a largo plazo y en una mayor eficiencia operativa de los sistemas de bombeo mecánico en levantamientos artificiales de superficie. Para lograrlo, se realizará un estudio exhaustivo de la metodología RCM, se estructurará el contenido de la guía fundamentados en normas, directrices industriales pertinentes y relevantes (Comité Estratégico de Políticas de Estándares, 2016) (SAE - The engineering society for advancing mobility land sea air and space , 1999), (SAE - The engineering society for advancing mobility land sea air and space , 2002), de tal manera se diseñará la guía detallada que incluirá los procedimientos paso a paso para implementar un plan de mantenimiento eléctrico basado en confiabilidad.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Elaborar una guía para el diseño de un plan de mantenimiento eléctrico basado en confiabilidad para un sistema de bombeo mecánico en un levantamiento artificial de superficie LAS

1.2 Objetivos específicos

Realizar un estudio de la metodología de Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM) para comprender sus principios, técnicas y aplicaciones específicas en sistemas eléctricos.

Estructurar el contenido de una guía, basándose en el estudio de la metodología RCM, normas aplicables al caso, directrices de desarrollo para el diseño de guías y normas (Comité Estratégico de Políticas de Estándares, 2016) (SAE - The engineering society for advancing mobility land sea air and space , 1999) (SAE - The engineering society for advancing mobility land sea air and space , 2002)

Diseñar una guía que incluya procedimientos paso a paso para la implementación de un plan de mantenimiento eléctrico basado en confiabilidad en sistemas de bombeo mecánico.

2. Términos y definiciones

La Metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) es un enfoque sistemático para asegurar que los sistemas continúen funcionando de manera efectiva dentro de su contexto operativo. se centra en identificar las funciones críticas de los sistemas y determinar las mejores estrategias de mantenimiento para prevenir fallos, maximizar la seguridad y minimizar los costos operativos.

En este capítulo se definirán los conceptos fundamentales de RCM, abarcando desde sus principios básicos (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad) hasta las técnicas y herramientas empleadas. Además, se abordarán las normas y directrices pertinentes, como ISO 14224, SAE-JA1011 y SAE-JA1012, que proporcionan un marco estandarizado para su aplicación. Este marco teórico no solo proporcionará una comprensión profunda de la metodología RCM, sino que también sentará las bases necesarias para el diseño de planes de mantenimiento eléctrico basados en confiabilidad, específicamente adaptados a los sistemas de bombeo mecánico en levantamientos artificiales de superficie (LAS).

2.1 Indicadores KPI

Los Indicadores Clave de Desempeño (KPI) son herramientas esenciales para medir y evaluar la efectividad del mantenimiento y la confiabilidad de los sistemas. Cada KPI debe contar con un nivel de rendimiento objetivo, deben ser específicos, realistas y basados en el tiempo (medición de la mejora en el rendimiento a largo plazo) A continuación, se presentan los indicadores a tener en cuenta para la metodología RCM:

2.1.1 Confiabilidad (Reliability)

Probabilidad de que un sistema o componente cumpla su función bajo condiciones específicas durante un período determinado. Enfocándose en identificar y gestionar modos de fallo críticos, se desarrollan estrategias de mantenimiento para prevenir o mitigar estas fallas, mejorando así la confiabilidad del sistema. The International Organization for Standardization (ISO,2016) la norma ISO 14224 (Anexo C, C3, 2016) afirma que mediante la siguiente ecuación la manera de determinar la confiabilidad es la siguiente:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (E.1)$$

Donde,

R(t): Confiabilidad en el tiempo t

λ : tasa de falla (Failure Rate)

t: Tiempo durante el cual se mide la confiabilidad

2.1.2 Disponibilidad (Availability)

Probabilidad de que un sistema esté operativo y pueda realizar su función cuando se necesite, maximizando su tiempo de uso y minimizando inactividad mediante estrategias de mantenimiento efectivas que previenen fallos y restauran rápidamente el servicio tras una falla. ISO 14224 (Anexo C, C2, 2016) expresa mediante la siguiente ecuación la manera de determinar la disponibilidad.

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \quad (\text{E.2})$$

Donde,

MTBF: Tiempo medio entre fallas.

MTTR: Tiempo medio de reparación.

2.1.3 Mantenibilidad (Maintenibility)

Facilidad y rapidez con la que un ítem puede ser mantenido o restaurado a un estado operativo en un tiempo determinado tras una falla, enfocándose en minimizar el tiempo y recursos necesarios para el mantenimiento, mejorando así la disponibilidad general. ISO 14224 (Anexo C, C4, 2016) expresa mediante la siguiente ecuación la manera de determinar la confiabilidad.

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (\text{E.3})$$

Ahora, el símbolo μ se le conoce como tasa de reparación, el cual es el inverso del tiempo promedio de reparación (MTTR) e ISO 14224 (Anexo C, C.4.2.3, 2016) expresa mediante la siguiente ecuación la manera de determinar este parámetro.

$$\mu = 1 / \text{MTTR} \quad (\text{E.4})$$

2.1.4 Tiempo medio entre fallas (MTBF - Mean Time Between Failures)

Tiempo promedio que transcurre entre fallos consecutivos de un ítem reparable. Este

indicador mide la confiabilidad del equipo e ISO 14224 (Anexo C, C.5.3.1, 2016) expresa mediante la siguiente ecuación la manera de determinar este parámetro.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (E.5)$$

Donde,

MTTF: Tiempo medio transcurrido hasta la falla.

MTTR: Tiempo medio de reparación.

2.1.5 Tiempo medio de reparación (MTTR – Mean Time To Repair)

Tiempo promedio requerido para reparar un componente o ítem el cual esté disponible para reestablecer la operación. Este indicador mide la disponibilidad y mantenibilidad del equipo y se expresa mediante la siguiente formula (E.6):

$$MTTR = t / n \quad (E.6)$$

Donde,

t: Suma del tiempo invertido en todas las reparaciones (Diagnostico, espera de repuestos, intervención física, pruebas funcionales después de la reparación)

n: Número total de intervenciones de reparación que se han realizado en el equipo o sistema

2.1.6 Tiempo medio transcurrido hasta la falla (MTTF – Mean Time To Failure)

Tiempo promedio que un sistema o componente opera antes de fallar, estimado utilizando los tiempos activos reales observados en el terreno. Este indicador mide la confiabilidad e ISO 14224 (Anexo C, C.5.4.1, 2016) expresa mediante la siguiente ecuación la manera de determinar este parámetro.

$$MTTF = 1 / \lambda \quad (E.7)$$

Ahora, el símbolo lambda (λ) se le conoce como tasa de falla (Failure Rate), valido para tasas de fallas constantes e ISO 14224 (Anexo C, C.3.2, 2016) expresa mediante la siguiente ecuación la manera de determinar este parámetro.

$$\lambda = n / t \quad (E.8)$$

Donde,

n = Cantidad de fallas que han ocurrido durante el tiempo de operación del equipo o sistema.

t = Tiempo en que el equipo o sistema ha estado operando de manera continua.

Sin embargo, en una situación general se suele suponer que la tasa de peligro, $\lambda(t)$ del ciclo de vida de un ítem mantenible presenta las siguientes etapas, véase Figura C.1 Sección 3.1.2 de la norma ISO14224:

|

Figura 1.

Curva de la bañera para la tasa de peligro de un ítem mantenible, tomada de la norma ISO

14224, sección 3.1.2



3. Modos de falla

Es la manera específica en que un componente, sistema o proceso puede fallar en cumplir su función deseada. Estos modos se analizan para desarrollar estrategias de mantenimiento que mitiguen o prevengan fallos, mejorando la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema, según The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, SAE INTERNATIONAL(2002), *Prácticas Recomendadas para Vehículos Aeroespaciales y de Superficie*, SAE JA1012 se encuentran los siguientes 5 conceptos claves concernientes a los modos de fallas:

3.1 Identificar los modos de falla

Antes de identificar los modos de falla en un sistema, es importante distinguir entre falla funcional y modos de falla. La falla funcional es la incapacidad de un activo para realizar una función requerida, mientras que los modos de falla describen cómo y por qué ocurre esa incapacidad, proporcionando detalles específicos sobre los mecanismos de fallo. Según The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, SAE INTERNATIONAL (1999), *Vehículo de Superficie/Estándar Aeroespacial*, SAE-JA1011(Sección 5.3) los modos de falla se identifican por cuales son los más probables que puedan causar cada falla funcional, los cuales son:

- a. Se deben identificar todos los modos de falla que tengan una probabilidad razonable de causar cada falla funcional.
- b. El método utilizado para decidir que constituye un modo de falla “razonablemente

probable” deberá ser aceptable para el propietario o usuario del bien.

c. Los modos de falla se identificarán a un nivel de causalidad que permita identificar una política adecuada de gestión de fallas.

d. Las listas de modos de falla deben incluir modos de falla que hayan ocurrido antes, modos de falla que actualmente están siendo evitados por programas de mantenimiento existentes y modos de falla que aún no han ocurrido pero que se consideran razonablemente probables (creíbles) en el contexto operativo.

e. Las listas de modos de falla deben incluir cualquier evento o proceso que pueda causar una falla funcional, incluido el deterioro, los defectos de diseño y el error humano, ya sea causado por los operadores o mantenedores (a menos que el error humano esté siendo abordado activamente mediante procesos analíticos aparte de RCM).

3.2 Estableciendo cual es el significado de “probable”

"Probabilidad razonable" se refiere a una probabilidad que los expertos en RCM consideran suficiente para justificar un análisis detallado. Decidir listar un modo de falla depende de su probabilidad y detalle; demasiados o muy pocos modos pueden llevar a un análisis ineficaz. La decisión se basa en la severidad de sus consecuencias.

3.3 Niveles de causalidad

Es la jerarquía de causas que llevan a una falla funcional. Estos niveles permiten descomponer y analizar las fallas de manera sistemática, logrando una comprensión más detallada

y estructurada del proceso de fallas en la metodología RCM, de tal manera se mencionan los siguientes niveles de causalidad:

3.3.1 Causas de la falla

Este nivel identifica las razones específicas por las cuales los modos de falla ocurren. Puede incluir factores como el desgaste de componentes, errores de operación, condiciones ambientales adversas, defectos de diseño, etc.

3.3.2 Causas raíz

Estas son las causas subyacentes más profundas que desencadenan las causas de la falla. Pueden involucrar problemas sistémicos como la falta de mantenimiento preventivo, la capacitación inadecuada del personal, deficiencias en los procedimientos operativos, etc.

3.4 Fuentes de información de los modos de falla

Se deben considerar los modos de falla previos en los mismos activos o similares, a menos que se haya prevenido su recurrencia. Fuentes de información incluyen personal familiarizado, registros técnicos y bases de datos. También se deben incluir modos de falla con rutinas de mantenimiento proactivas, revisando el mantenimiento programado y sus consecuencias. Además, se deben identificar modos de falla potenciales que aún no han ocurrido, utilizando juicio experto para abordarlos adecuadamente.

3.5 Tipos de modos de falla

El deterioro ocurre cuando un activo, inicialmente capaz de operar, reduce su desempeño al entrar en servicio, abarcando desgaste, corrosión, erosión, degradación y otros factores. Si el diseño o configuración de un activo no cumple con los requisitos funcionales esperados, o los procedimientos actuales no logran detectar estas deficiencias, se deben identificar como modos de falla para aplicar políticas de manejo.

Las fallas funcionales también ocurren cuando el esfuerzo sobrepasa la capacidad del activo, y estos errores, muchas veces atribuibles a fallos humanos, requieren clasificación y análisis adecuado, estos errores suelen agruparse de la siguiente manera:

a. Operación incorrecta: La operación incorrecta se presenta en dos formas: una sobrecarga sostenida, donde el activo opera a niveles que exceden su capacidad, como un motor sobrecargado que falla anticipadamente, y una sobrecarga inesperada, que ocurre cuando el activo funciona incorrectamente, como al operar en reversa mientras avanza, causando daños estructurales.

b. Ensamblaje incorrecto: Por ejemplo, si un mecánico deja una herramienta en una caja de engranajes o un electricista cablea un interruptor incorrectamente.

c. Daño externo: Por ejemplo, si la carcasa de una bomba es golpeada por un camión montacargas.

Ahora, si estos aumentos en el esfuerzo empleado son probables en el contexto en cuestión (y si no han sido abordados por un proceso analítico distinto), se deben incluir en la lista de modos de falla para que se puedan encontrar las políticas de manejo de fallas adecuadas, por consiguiente, se clasifican los modos de falla en los siguientes tipos:

3.5.1 Modos de falla funcionales

Se refiere a la pérdida de una función específica que un sistema o componente debe realizar.

3.5.2 Modos de falla parciales

Se producen cuando el sistema o componente aún funciona, pero no al nivel de desempeño requerido.

3.5.3 Modos de falla intermitentes

Ocurren de manera esporádica, haciendo que el sistema o componente funcione correctamente en algunos momentos y falle en otros.

3.5.4 Modos de falla catastróficos

Resultan en una pérdida completa de la función y a menudo causan daños significativos.

3.5.5 Modos de falla degradativos

Se manifiestan como una degradación gradual del desempeño del sistema o componente antes de una falla total.

4. Efectos de falla

Los efectos de falla se refieren a las consecuencias directas e inmediatas de un modo de falla en un sistema o componente. Estos efectos son fundamentales para determinar la criticidad de los modos de falla y para priorizar las estrategias de mantenimiento. Según The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, SAE INTERNATIONAL (2002), *Practicas Recomendadas para vehículos aeroespaciales y de superficie*, SAE-JA1012 (Sección 9) los efectos de falla a tener en cuenta son:

- Suposiciones básicas, los efectos de la falla describirán lo que sucedería si no se realiza ninguna tarea específica para anticipar, prevenir o detectar la falla.

- Información necesaria, los efectos de falla incluirán toda la información necesaria para respaldar la evaluación de las consecuencias de la falla, tales como:

a. ¿Qué evidencia (si la hay) de que se ha producido la falla (en el caso de funciones ocultas, ¿qué sucedería si ocurriera una falla múltiple?)

b. ¿Qué hace (si acaso) matar o herir a alguien, o tener un efecto adverso en el medio ambiente?

c. ¿Qué hace (si acaso) para tener un efecto adverso en la producción o las operaciones?

d. ¿Qué daño físico (si lo hay) es causado por la falla?

e. ¿Qué (si existe algo) se debe hacer para restaurar la función del sistema después de la falla?

Los efectos de falla proporcionan la información necesaria para seleccionar políticas de manejo que eviten, eliminen o minimicen sus consecuencias, asegurando la satisfacción de los dueños o usuarios del activo. Estos efectos se clasifican en varias categorías.

4.1 Efectos de falla económicos

Son consecuencias financieras del modo de falla, que incluyen costos directos como reparaciones, reemplazos y costos indirectos como pérdida de producción, penalizaciones y aumento de costos operativos.

4.2 Efectos de falla de seguridad

Son consecuencias que ponen en riesgo la seguridad de las personas o el entorno, siendo prioritarias en los análisis de RCM por su implicación en lesiones, daños ambientales o fatalidades.

4.3 Efectos de falla operacionales

Son consecuencias que afectan la operación normal del sistema, como la pérdida de función, reducción del rendimiento o interrupciones, impactando inmediatamente su capacidad para cumplir con su función.

4.4 Efectos de falla ambientales

Son los impactos ambientales de una falla, como derrames, emisiones no controladas y daños ecológicos, relevantes para cumplir con regulaciones y mantener la sostenibilidad.

Cada efecto de falla debe evaluarse según su probabilidad y severidad, e incluir una breve descripción de la acción correctiva necesaria.

5. Consecuencia de fallas

Según The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, SAE INTERNATIONAL (1999), *Vehículo de Superficie/Estándar +Aeroespacial*, SAE-JA1011(Sección 5.5)

- Las consecuencias de cada modo de falla se clasificarán formalmente de la siguiente manera:

a. El proceso de categorización de consecuencias deberá separar los modos de falla ocultas de los modos de falla evidentes.

b. El proceso de categorización de consecuencias deberá distinguir claramente los eventos (modos de falla y fallas múltiples) que tienen consecuencias para la seguridad y/o ambientales de aquellos que solo tienen consecuencias económicas (consecuencias operativas y no operativas).

- La evaluación de las consecuencias de la falla se llevará a cabo como si no se estuviera realizando ninguna tarea específica para anticipar, prevenir o detectar la falla.

En este contexto, cada modo de falla tiene consecuencias específicas. Si estas son graves, se deben tomar medidas para prevenir o anticipar la falla. Si las consecuencias son menores, se puede corregir cuando ocurra. Lo crucial es gestionar las consecuencias, más que prevenir los modos de falla en sí.

5.1 Fallas evidentes y ocultas

Un modo de falla oculta no es perceptible para los operadores en condiciones normales y solo se revela cuando ocurre una falla adicional. En contraste, un modo de falla evidente es

detectable por los operadores en condiciones normales. Ahora, según The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, SAE INTERNATIONAL(2002), *Prácticas Recomendadas para vehículos aeroespaciales y de superficie*, SAE-JA1012 (Sección 6.2.2.8) menciona que la función de cualquier protección es asegurar que las consecuencias de la falla de la función protegida sean mucho menos serias de lo que hubiesen sido sino tuviese protección. Así, cualquier función protectora hace parte de un sistema de dos componentes.

- a. La función protectora.
- b. La función protegida.

La existencia de estos sistemas genera dos tipos de fallas posibles: evidentes o no evidentes. A continuación, se detallan las implicaciones de cada tipo.

5.1.1 Fallas evidentes de las funciones protectoras

Una falla “evidente” de una función protectora es aquella cuyos efectos son perceptibles para los operadores en condiciones normales. Esto crea tres escenarios posibles en cualquier período, los cuales son:

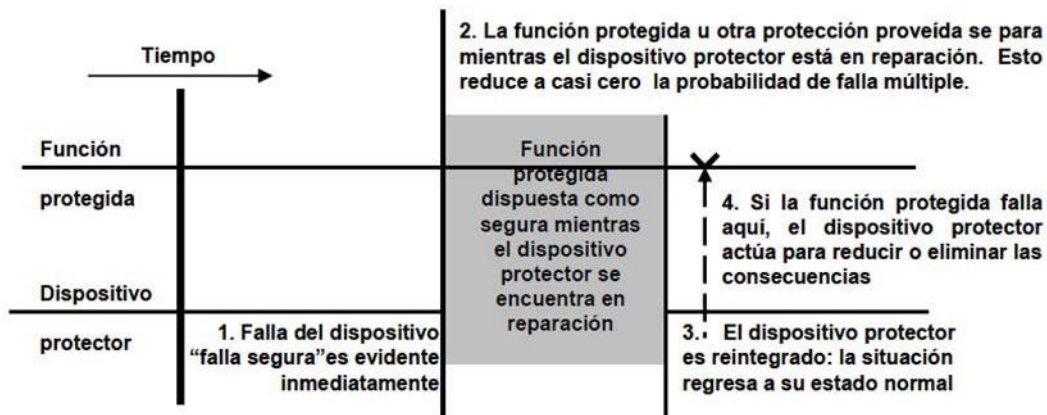
- a. La primera posibilidad es que ni la función protectora ni la función protegida fallen, permitiendo que todo proceda normalmente.
- b. La segunda posibilidad es que falle la función protegida antes de la protección. En este caso, la protección actuará, reduciendo o eliminando las consecuencias de la falla de la función protegida, según su naturaleza.

- c. La tercera posibilidad es que falle la función protectora antes de la función protegida. Como esta falla es evidente, la pérdida de protección debe hacerse aparente. En esta situación, la

probabilidad de que falle la función protegida mientras la función protectora está inactiva debe ser casi nula, ya sea mediante el paro de la función protegida o la provisión de protección alternativa como se muestra en la Figura 1. Las consecuencias de una falla evidente de la función protectora suelen clasificarse como “operacionales” o “no operacionales”.

Figura 2.

Falla evidente de una función protectora, tomada de la norma SAE-JA1012, sección 10.1.1.1, 2002.



5.1.2 Funciones protectoras cuya falla no es evidente

Para identificar fallas ocultas, hay que preguntarse, ¿Si los efectos del modo de falla serían evidentes para el equipo de operadores en circunstancias normales si el modo ocurre aislado?. Si la respuesta es no, la falla es oculta; si es sí, la falla es evidente. Aquí, “aislado” significa sin fallos adicionales y sin considerar revisiones de mantenimiento programado. Las fallas ocultas crean cuatro escenarios posibles, dos de los cuales también se aplican a fallas evidentes de funciones protectoras. Estos escenarios son:

|

a. El primero es en el que ninguna función falla, en cuyo caso todo procede normalmente como antes.

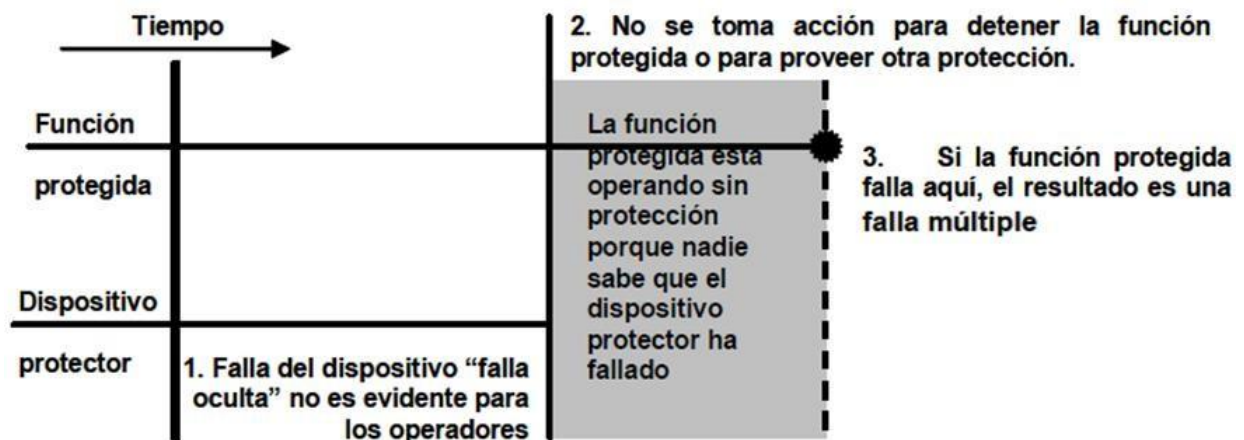
b. El segundo escenario es que la función protegida falle mientras la protección está activa. En este caso, la protección cumple su función y reduce o elimina las consecuencias de la falla de la función protegida.

c. El tercer escenario es que la protección falle mientras la función protegida está operando. En este caso, la pérdida de protección no tiene consecuencias directas y no es evidente para los operadores.

d. El cuarto escenario es que la protección falle y, durante este período, la función protegida también falle. Esto se conoce como falla múltiple, y ocurre porque la falla de la protección no es evidente, impidiendo que se tomen acciones correctivas. La secuencia de eventos que predomina en una falla múltiple se muestra en la Figura 2.

Figura 3.

Falla oculta de una función protectora, tomada de la norma SAE-JA1012, sección 10.1.1.2, 2002



5.2 Consecuencias en la seguridad, el ambiente, operacionales y no operacionales

En la metodología RCM, las consecuencias de seguridad y medioambientales son prioritarias debido a su potencial de daño grave. Las consecuencias operacionales afectan la funcionalidad del sistema, mientras que las consecuencias ocultas son peligrosas por su naturaleza inadvertida. Las consecuencias no operacionales, aunque menos urgentes, son clave para la gestión económica. Cada categoría debe evaluarse por probabilidad y severidad para definir la estrategia de mantenimiento y priorizar recursos eficazmente. De tal manera, según The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, SAE INTERNATIONAL(2002), *Prácticas Recomendadas para vehículos aeroespaciales y de superficie*, SAE-JA1012 (Sección 10.1.2) se observan las siguientes categorías:

5.2.1 Consecuencias en la seguridad

Una falla impacta la seguridad si existe una probabilidad intolerable de causar muerte o lesiones. La distinción entre una probabilidad “tolerable” e “intolerable” se discute con más detalle en la norma (SAE-JA1012, sección 12.1.3, 2002).

5.2.2 Consecuencias ambientales

Las fallas se consideran ambientales si causan daños al entorno o violan normativas ambientales a cualquier nivel. Las regulaciones pueden ser municipales, regionales, nacionales o corporativas, y cualquier falla que viole estas normativas se clasifica con consecuencias

ambientales.

5.2.3 Consecuencias operacionales

Las fallas que afectan las funciones primarias de los equipos impactan la capacidad de ingresos de la organización. Estos costos suelen ser mayores que los de reparación y deben considerarse al evaluar la rentabilidad de las políticas de manejo de fallas. En general, las fallas afectan las operaciones de cuatro maneras:

- a. Rendimiento o la producción total.
- b. Calidad del producto.
- c. Servicio al consumidor (incurriendo en penalidades financieras).
- d. Incrementando los costos operacionales en adición a los costos de reparación.

5.2.4 Consecuencias no operacionales

Las fallas evidentes sin impacto en seguridad, ambiente u operación se clasifican como no operacionales. Sus consecuencias son principalmente económicas, limitadas a los costos de reparación y daños secundarios.

Las consecuencias se pueden categorizar por medio de la siguiente tabla la cual nos indica cual es la mejor opción para el tipo de tipo de problema que se está presentando en ese momento.

Figura 4.

Clasificación de las consecuencias de falla, tomada de la norma SAE-JA1012, Tabla C.2 ANEXO C, 2002

Consecuencias	Categoría			
	Catastróficas Falla que resulta en fatalidades o pérdida del sistema	Severas Lesión o enfermedad severa o daño mayor al sistema	Moderadas Lesión o enfermedad leve o daño menor al sistema	Menores Menor que lesión o enfermedad leve o daño menor al sistema
Seguridad	I — Pérdida de vidas — Sistemas críticos para la seguridad inoperables	V — Lesión grave a personal — Potencial de pérdida de funciones de seguridad	IX — Lesiones que requieren de tratamiento médico — Efecto limitado en funciones de seguridad	XIII - Lesiones que no requieren de tratamiento médico - Efecto menor en funciones de seguridad
Medioambiente	II Contaminación mayor	VI Contaminación significativa	X Contaminación	XIV Ninguna contaminación o contaminación insignificante
Producción	III Interrupción extendida en producción/operación	VII Interrupción en producción sobre límite aceptable ^a	XI Interrupción en producción debajo de límite aceptable ^a	XV Interrupción menor en producción
Operacional	IV Muy alto costo de mantenimiento	VIII Costo de mantenimiento sobre nivel normal aceptable ^a	XII Costo de mantenimiento en o debajo de nivel normal aceptable ^a	XVI Bajo costo de mantenimiento
^a Es necesario definir los límites aceptables para cada aplicación.				

6. Políticas de manejo de fallas

Proceso clave para gestionar fallas en un sistema, seleccionando políticas basadas en la criticidad, probabilidad de ocurrencia e impacto en la operación, para asegurar su funcionamiento confiable y eficiente. Ahora según The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space, SAE INTERNATIONAL(2002), *Prácticas Recomendadas para vehículos aeroespaciales y de superficie*, SAE-JA1012 (Sección 11) estas políticas se clasifican de la

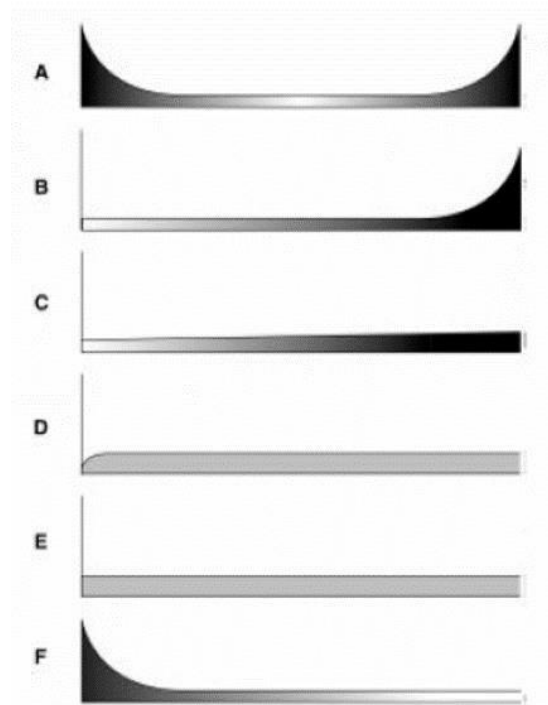
siguiente manera:

6.1 Relación entre longevidad y falla

Un factor clave en la selección de políticas de manejo de fallas es la relación entre la longevidad del elemento y la probabilidad de falla, que puede variar de seis formas distintas según el envejecimiento como se muestra en la Figura 3.

Figura 5.

Seis patrones de falla, tomada de la norma SAE-JA1012, sección 11.1, 2002.



Los patrones de falla A y B muestran un aumento rápido de probabilidad de falla por desgaste; el patrón C, un aumento constante sin desgaste; el D, un aumento inicial rápido seguido de estabilización; el E, una probabilidad constante (falla aleatoria); y el F, alta mortalidad temprana con posterior estabilización. Estos patrones suelen asociarse con desgaste, fatiga, corrosión y otros factores relacionados con la longevidad del equipo.

6.2 Técnicamente factible y vale la pena hacerlo

Una tarea programada solo es útil si reduce las consecuencias de una falla lo suficiente como para justificar sus costos. Si no hay una tarea adecuada y las consecuencias de la falla son inaceptables, se debe encontrar otra forma de gestionarlas, siempre que sea técnicamente viable. La factibilidad depende de las características del modo de falla y la política de manejo.

6.3 Efectividad de costo

En la metodología RCM, se debe elegir la política más económica para gestionar las consecuencias de la falla, no necesariamente la más avanzada técnicamente.

6.4 Selección de las políticas de manejo de fallas

La selección de la política adecuada depende de la criticidad del equipo, la accesibilidad, el costo de la falla y la disponibilidad de datos de monitoreo. Por lo tanto, hay varios tipos de manejos de fallas permitiendo así, gestionar el proceso más confiable, eficiente y optimizando los recursos de mantenimiento. Estos tipos son:

6.4.1 Mantenimiento Preventivo (*Preventive Maintenance*)

Implica la realización de tareas programadas para prevenir fallas antes de que ocurran. Se basa en la programación de inspecciones, reparaciones y reemplazos a intervalos regulares.

Características:

- Planificación y ejecución periódicamente.
- Reduce la probabilidad de fallas inesperadas.
- Ideal para componentes con vida útil predecible.

6.4.2 Mantenimiento Predictivo (*Predictive Maintenance*)

Basada en el monitoreo de la condición del equipo en tiempo real para predecir cuándo es probable que ocurra una falla. Utiliza tecnologías como análisis de vibraciones, termografía y análisis de lubricantes. Características:

- Se basa en el estado real de equipo.
- Permite intervenciones antes de que ocurra la falla.
- Optimiza el tiempo de la vida de los componentes.

6.4.3 Mantenimiento Correctivo (*Corrective Maintenance*)

Implica la reparación o reemplazo de componentes después de que se ha producido una falla. Es reactiva y se realiza cuando el equipo ya no puede cumplir su función. Características:

- No requiere planificación previa.
- Se realiza después de la ocurrencia de una falla.

- Puede resultar en tiempos de inactividad prolongados y costosos.

6.4.4 Mantenimiento Proactivo (*Proactive Maintenance*)

Busca identificar y corregir las causas raíz de las fallas antes de que ocurran. Involucra análisis de causa raíz y mejoras en los procesos de diseño y operación. Características:

- Enfocado en la prevención de la recurrencia de fallas.
- Utiliza herramientas como análisis de modos de falla, efectos y análisis de criticidad (FMECA).
- Mejora confiabilidad a largo plazo.

6.4.5 Operar hasta fallar (*Operate to failure*)

Estrategia en la cual el equipo se deja operar hasta que falle, y solo entonces se repara o reemplaza. Es adecuada para equipos no críticos y de bajo costo. Características:

- Sin mantenimiento preventivo planificado.
- Utilizado para equipos no esenciales.
- Puede aumentar el riesgo de fallas inesperadas si se usa incorrectamente.

7. Herramienta de modos de falla, efectos y análisis de criticidad (FMECA)

En la metodología RCM, no todos los modos de falla tienen la misma importancia. El análisis FMECA clasifica los modos de falla por su impacto en seguridad, operaciones y finanzas,

lo que guía la priorización de recursos y acciones de mantenimiento para mejorar la confiabilidad del sistema.

7.1 ¿Cómo se usa la herramienta FMECA?

7.1.1 Definir el sistema y sus componentes

- Desglosa el sistema en sus componentes principales y subcomponentes.
- Documenta las funciones de cada componente y sus especificaciones de operación.

7.1.2 Identificar modos de falla

Como se menciona en el capítulo 5(sección 5.1) de esta tesis, se identifican los modos de falla en donde por medio de información de datos históricos, experiencia de operadores, mantenedores y datos del fabricante se puede escoger cual modo de falla se está presentando.

7.1.3 Determinar efectos de falla

Como se menciona en los capítulos 6 y 7 de esta tesis se consideran los efectos a nivel local (en el componente) y a nivel del sistema completo mostrando las consecuencias de los modos de falla en la operación general.

7.1.4 Evaluar la criticidad

- Asigna una calificación de la severidad de cada efecto de falla basada en su impacto.
- Estima la probabilidad de ocurrencia de cada modo de falla.
- Calcula un índice de criticidad combinando la severidad y la probabilidad de cada modo de falla.

7.1.5 Priorizar modos de falla

- Utiliza el índice de criticidad para priorizar los modos de falla que necesitan atención inmediata.
- Clasifica los modos de falla en categorías como alta, media y baja criticidad.

7.1.6 Desarrollar estrategias de mantenimiento

Como se menciona en el capítulo 8 (sección 8.4) de esta tesis (Referenciar se desarrolla y seleccionan las estrategias de mantenimiento más adecuadas (Mantenimiento preventivo, predictivo, correctivo, proactivo y operar hasta fallar) documentando las tareas de mantenimiento específicas para prevenir o mitigar los modos de falla críticos, esto se realiza para los modos de falla con alto índice de criticidad.

7.1.7 Implementar y revisar

- Implementa las estrategias de mantenimiento desarrolladas.
- Revisa y actualiza periódicamente el análisis FMECA en función de los datos de operación y mantenimiento, así como de las nuevas fallas que se detecten.

8. Estructura de la guía de mantenimiento

De acuerdo con los capítulos anteriormente presentados se estructura el contenido de la guía para poder realizar el paso a paso de como implementar un plan de mantenimiento eléctrico basado en confiabilidad en sistemas de bombeo mecánico.

8.1 Introducción

El mantenimiento eléctrico es esencial para la confiabilidad y eficiencia de sistemas industriales complejos, como los de bombeo mecánico en levantamientos artificiales de superficie. Esta guía ofrece un procedimiento educativo para diseñar planes de mantenimiento basados en la metodología RCM, explicando cada etapa. Utiliza herramientas como el análisis de fallas y estrategias de mantenimiento fundamentadas en normas internacionales, complementadas con ejemplos para garantizar su uso efectivo en el campo.

8.2 Levantamiento de campo

El levantamiento de campo en RCM recopila datos sobre equipos, entorno y desempeño para diseñar planes de mantenimiento adaptados. Esta guía aplica RCM a un sistema de levantamiento artificial, analizando componentes críticos como motores y variadores, identificando funciones clave, modos de falla y estrategias específicas, en un modelo adaptable y educativo.

8.3 Definición de funciones

Un proceso RCM comienza definiendo las funciones y estándares de desempeño del activo en su contexto operacional.

8.4 FMECA

La herramienta FMECA en la metodología RCM analiza y prioriza fallas en un sistema de bombeo mecánico, definiendo el sistema, sus funciones, y los modos de falla potenciales. Se evalúan los efectos y causas de las fallas, calculando su criticidad mediante el Número de Prioridad de Riesgo (RPN).

8.5 Tipo de tareas

Son las estrategias de mantenimiento seleccionadas para gestionar fallas según su criticidad, impacto y costo-beneficio, asegurando la confiabilidad y eficiencia del sistema. Para determinar la tarea adecuada, se responden preguntas clave que permiten decidir si una acción específica es necesaria.

8.6 Asignación de tareas

Consiste en asignar responsabilidades según las estrategias de mantenimiento seleccionadas, considerando competencias, recursos y la criticidad del equipo.

8.7 Descripción de hoja de ruta

Es un plan que organiza las actividades de mantenimiento, define responsabilidades, recursos y plazos, asegurando que las estrategias RCM se implementen de forma práctica y efectiva en un sistema de bombeo mecánico.

La información presentada en este capítulo será desarrollada con mayor profundidad en la guía de mantenimiento eléctrico basada en confiabilidad previamente mencionada, donde se aplicarán de forma práctica y detallada los conceptos y metodologías expuestos.

9. Conclusiones

Este trabajo de grado proporciona a la comunidad universitaria una herramienta educativa estructurada que fortalece la formación de los estudiantes interesados en el diseño de planes de mantenimiento eléctrico basados en confiabilidad. La guía diseñada fomenta el aprendizaje activo y el desarrollo de competencias críticas en la ingeniería eléctrica direccionando a los futuros profesionales para enfrentar los retos del mantenimiento eléctrico en entornos industriales.

La metodología RCM se integra de manera efectiva en el diseño y desarrollo de la guía al proporcionar un enfoque paso a paso para la identificación, análisis y priorización de fallas en sistemas de bombeo mecánico. Mediante el diligenciamiento estructurado de la guía, los usuarios pueden asignar tareas de mantenimiento adecuadas y seleccionar estrategias óptimas (correctivas, preventivas o predictivas) basadas en un análisis de riesgo fundamentado, garantizando la confiabilidad y el rendimiento del sistema.

A futuro, la guía puede adaptarse y ampliarse a otros sistemas eléctricos complejos, sirviendo como referencia tanto en entornos educativos como industriales. Además, su enfoque en la confiabilidad y la optimización de recursos la convierte en una herramienta valiosa para mejorar la sostenibilidad operativa y económica en diferentes sectores productivos.

Referencias bibliográficas

Comité Estratégico de Políticas de Estándares. (31 de octubre de 2016). Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. (*ICS 75.200; 75.180.01*), ISBN 978 0 580 90387 8.

O'Donnell , P. (2023). Innovative solutions for the shortage of qualified maintenance technicians. Sterling Engineering Inc.

SAE - The engineering society for advancing mobility land sea air and space . (1999). Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes.

SAE - The engineering society for advancing mobility land sea air and space . (2002). Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).

Stel , O. (2021). Mantenimiento eléctrico.

TMA Systems . (2022). Addressing labor shortage and skill deficit in maintenance management.

Zavala , A. (2024). Mantenimiento Basado en la Confiabilidad: Optimizando la Gestión de Activos y la Eficiencia Operativa.

International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016 - Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO.

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Guía para el diseño de un plan de mantenimiento eléctrico basado en confiabilidad para un sistema de bombeo mecánico en un levantamiento artificial de superficie LAS

Apéndice B. Plantilla para el desarrollo de la guía de mantenimiento eléctrico.