

IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO ESTRATÉGICO
BASADO EN FMECA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA Y OPERATIVIDAD EN LA
PLANTA ELEVADORA GIBRALTAR.

Nelson Ricardo Fontecha, Juan David Castro López

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Iván Darío Gómez Lozano

MsC. En Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia De Mantenimiento

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director de tesis, Msc. Iván Darío Gómez Lozano por su invaluable apoyo, orientación y dedicación a lo largo de todo este proceso. Sus sabias recomendaciones y su constante motivación fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

Agradecemos profundamente a nuestras familias, quienes nos brindaron su amor, paciencia y comprensión en todo momento. Sin su aliento y su apoyo incondicional, no hubiéramos logrado superar las dificultades que encontramos en el camino.

A nuestros compañeros de carrera y amigos, que nos ofrecieron su amistad y consejos, así como su apoyo emocional y académico en los momentos de mayor tensión, quienes, con sus ideas y su disposición para colaborar, enriquecieron el desarrollo de este proyecto.

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por proporcionarnos los recursos y el ambiente necesario para poder llevar a cabo este trabajo de investigación, también, queremos agradecer a todos los profesores que, durante nuestra formación académica, nos guiaron, compartieron sus conocimientos y nos prepararon para llegar hasta aquí.

Finalmente, a todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron al éxito de este proyecto, ya sea con su apoyo directo o indirecto. Su ayuda, aunque a veces intangible, ha sido de gran valor para nosotros.

Tabla de Contenido

Glosario.....	8
Resumen	10
Abstract.....	12
Introducción	14
1. Objetivos.....	15
1.1. Objetivo General	15
1.2. Objetivos específicos.....	15
2. Justificación	16
2.1. Ubicación de la Estructura de Captación y de Entrega de la Estación de Bombeo....	16
2.2. Análisis de Modo De Falla, Efectos y Criticidad (FMECA)	19
3. Marco Conceptual.....	23
3.1. Definición de los Rangos de acción	27
3.2. Aplicación de la metodología FMECA – Modos de falla Análisis de criticidad y efecto 31	
3.3. Explicación del árbol de equipos	33
Conclusiones.....	59
Recomendaciones.....	61
Referencias.....	62
Anexos	63

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Desglose de sistema o proceso</i>	25
Tabla 2 <i>Severidad</i>	27
Tabla 3 <i>Frecuencia</i>	28
Tabla 4 <i>Detectabilidad</i>	28
Tabla 5 <i>Ejemplos de jerarquización del árbol de equipos</i>	32
Tabla 6 <i>Taxonomía del sistema de bombeo con sus respectivos niveles de jerarquía</i>	33
Tabla 7 <i>Ejemplo de una falla funcional del equipo limpia rejillas hidráulico</i>	37
Tabla 8 <i>Método de detección</i>	39
Tabla 9 <i>Ejemplos de modos de falla de un componente con su función principal falla funcional y modo de falla (causa de falla)</i>	40
Tabla 10 <i>Ejemplos de modos de fallas analizados en la planta Gibraltar</i>	40
Tabla 11 <i>Ejemplos modos de falla Eléctricos</i>	41
Tabla 12 <i>Ejemplo de mecanismo de falla evaluado en el sistema de bombeo componente reductor de velocidad, bomba de tornillo</i>	42
Tabla 13 <i>Ejemplo de Mecanismos de falla Norma ISO 14224</i>	43
Tabla 14 <i>Ejemplo de algunos equipos con criticidad alta</i>	45
Tabla 15 <i>Ejemplo de equipos con criticidad media</i>	46
Tabla 16 <i>Equipos con criticidad baja</i>	48
Tabla 17 <i>Indicadores de confiabilidad</i>	51
Tabla 18 <i>Indicadores mantenimiento preventivo</i>	51
Tabla 19 <i>Indicadores de gestión de fallas</i>	52
Tabla 20 <i>Indicadores de costo</i>	52

Plan de Mantenimiento Estratégico Basado FMECA	5
Tabla 21 <i>Indicadores de mejora continua</i>	52
Tabla 22 <i>Reporte de causa de fallas y tareas de mantenimiento</i>	54
Tabla 23 <i>Tareas de mantenimiento actuales y actualizadas</i>	54

Lista de figuras

Figura 1 <i>Planta Gibraltar</i>	17
Figura 2 <i>Panorámica Planta Gibraltar</i>	17
Figura 3 <i>P&DI Planta Gibraltar (EABB)</i>	19
Figura 4 <i>Proceso RCM</i>	22
Figura 5 <i>Curva de Pareto cantidad de fallas estación elevadora de aguas residuales</i>	22
Figura 6 <i>Diagrama de proceso</i>	24
Figura 7 <i>Matriz de prioridad</i>	29
Figura 8 <i>Diagrama de fallas</i>	31
Figura 9 <i>Clasificación de la taxonomía con niveles taxonómicos</i>	32
Figura 10 <i>Equipos instalados en el sistema de canales actuador Limitorque</i>	36
Figura 11 <i>Pgmanten_ integridad y confiabilidad</i>	37
Figura 12 <i>Categorías de mantenimiento</i>	50

Lista de Anexos

Anexo 1 <i>Clasificación NPR críticos</i>	63
Anexo 2 <i>Clasificación NPR semicríticos</i>	64
Anexo 3 <i>Clasificación NPR no críticos</i>	69

Glosario

Modo de falla: Modo de falla es la forma específica en la que un componente, equipo o sistema deja de cumplir su función prevista.

Falla funcional: ocurre cuando un equipo o sistema ya no puede cumplir con la función para la cual fue diseñado, o lo hace de forma inadecuada. No siempre implica que algo se haya roto físicamente; a veces el equipo sigue funcionando, pero no de la manera esperada.

Función: Función es lo que se espera que haga un equipo, componente o sistema bajo condiciones normales de operación.

Numero de prioridad de riesgo (NPR): es un valor numérico que se utiliza para clasificar y priorizar los riesgos asociados a posibles fallas en un sistema o equipo. Se calcula multiplicando tres factores: severidad de falla, la probabilidad de que ocurra y la posibilidad de detectarla antes de que cause un problema (Nachlas, 2023).

Severidad: es una medida que indica qué tan grave sería el impacto de una falla si llegara a ocurrir. Se enfoca en las consecuencias que tendría esa falla en la seguridad, el funcionamiento del equipo, la producción o el medio ambiente.

Probabilidad: se refiere a la posibilidad de que una falla ocurra durante la operación normal de un equipo o sistema. En el contexto de herramientas como el AMEF, este término se usa para estimar con qué frecuencia puede presentarse una determinada falla, basándose en datos históricos, experiencia técnica o condiciones de operación.

Detectabilidad: indica qué tan fácil o difícil es identificar una falla antes de que cause consecuencias mayores. En el análisis de riesgos, se usa para evaluar la capacidad que se tiene para detectar una falla o su causa antes de que afecte la operación (Aguilar-Otero et al., 2010).

FMECA: es una herramienta que se utiliza para identificar los modos de falla potenciales de un sistema, analizar sus efectos y evaluar su criticidad.

Criticidad: Criticidad es el nivel de importancia o gravedad que se le asigna a una falla potencial, considerando factores como el impacto en la operación, la seguridad, el ambiente y los costos.

Confiabilidad: Confiabilidad es la capacidad que tiene un equipo, sistema o componente para cumplir su función de manera adecuada durante un período de tiempo determinado y bajo condiciones específicas de operación (Parra, 2005).

MTBF: es una medida que indica el tiempo promedio que un equipo o sistema opera correctamente antes de presentar una falla.

MTTR: es el tiempo promedio que se tarda en reparar un equipo o sistema después de una falla, hasta que vuelve a estar operativo. Incluye tanto el diagnóstico del problema como el tiempo que lleva hacer la reparación.

Estrategia de mantenimiento: conjunto de planes herramientas métodos para garantizar la disponibilidad confiabilidad y disponibilidad de los equipos o de los activos en una organización

EABB: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

SAP PM: Sistema de Gestión en Mantenimiento

Contexto Operacional: conjunto de condiciones, variables restricciones y factores en que opera un equipo sistema o proceso cumpliendo con una normatividad

Taxonomía: clasificación sistémica de ítems en grupos genéricos basados en varios factores como la ubicación, el sistema el uso o la función del equipo, la ubicación técnica ISO- 14224

Avería: es el estado de un componente que se caracteriza por la incapacidad de realizar la función requerida para lo cual fue diseñado norma española UNE- EN 60812

Resumen

Título: Implementación de un Plan de Mantenimiento Estratégico Basado en FMECA para Mejorar la Eficiencia y Operatividad en la Planta Elevadora Gibraltar*

Autor: Nelson Ricardo Fontecha, Juan David Castro López**

Palabras Clave: Análisis de Modo De Falla, Efectos y Criticidad, Severidad, Detectabilidad, ocurrencia, Numero de prioridad de Riesgo (NPR).

Descripción: En la planta elevadora Gibraltar, el mantenimiento presenta varios desafíos que afectan su eficiencia y operatividad. Actualmente, los problemas no están claramente categorizados, las tareas de mantenimiento no se realizan en horarios establecidos y los registros de activos no se han actualizado. Además, se producen errores constantemente y no existe una investigación organizada para detectar fallas. La falta de un plan claro y la falta de comprensión sobre cómo agrupar los diferentes tipos de atención dificultan aún más la gestión. Se sugiere el uso del Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (FMECA) como una herramienta clave para mejorar la planificación y el rendimiento del mantenimiento y abordar estos problemas. Este método busca mejorar la gestión, optimizar los procesos y garantizar un mejor servicio en la planta de Gibraltar y otras estaciones de bombeo y elevación de la EABB.

Utilizando un enfoque basado en la ingeniería de confiabilidad que permite ordenar, gestionar y mejorar los trabajos, el objetivo principal es identificar los problemas más importantes en la planificación y ejecución del mantenimiento (Parra, 2005). Como parte de esta estrategia, se modificarán los planes de mantenimiento para tener en cuenta factores importantes como las normas, la clasificación del sistema, la criticidad de los activos, el análisis de fallos, la evaluación de riesgos y la determinación de la frecuencia óptima.

Con este cambio, se deben elaborar mejores planes de mantenimiento, lo que no solo mejorará el funcionamiento de la planta, sino que también ayudará a reducir el tiempo de reparación (MTTR) y a prolongar el tiempo entre fallos (MTFB). Los procesos a largo plazo serán más estables, eficientes y duraderos.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Iván Darío Gómez Lozano. MsC

Abstract

Title: Implementation of a Strategic Maintenance Plan Based on FMECA to Improve Efficiency and Operational Performance at the Gibraltar Elevator Plant. **3***

Author(s): Nelson Ricardo Fontecha, Juan David Castro Lopez**

Key Words: Failure Mode Effects and Criticality Analysis, Severity, Detectability, Occurrence, Risk Priority Number (RPN).

Description: At the Gibraltar pumping station, maintenance faces several challenges that impact its efficiency and operability. Currently, there is no clear classification of failures, maintenance tasks do not have well-defined frequencies, and asset records have not been updated. Additionally, recurring failures occur, and there is no structured analysis to identify weak points. The lack of a defined strategy and confusion in the classification of maintenance types further complicate management.

To address these issues, the implementation of **FMECA (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis)** is proposed as a key tool to improve maintenance planning and execution. This approach aims to optimize processes, enhance management indicators, and ensure more efficient maintenance at the Gibraltar station and other pumping and lifting stations of **EABB**.

The main objective is to identify the most critical problems in maintenance planning and execution by applying a **reliability engineering-based methodology** that helps structure, organize, and optimize tasks. As part of this strategy, maintenance plans will be updated, considering key aspects such as regulations, system classification, asset criticality, failure analysis, risk assessment, and optimal frequency determination.

With this implementation, a **more effective maintenance strategy** is expected to be designed, not only improving the plant's operation but also helping to **reduce repair times (MTTR) and increase the time between failures (MTBF)**. This will enable a more reliable, efficient, and sustainable operation in the long term.

* Degree Work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Specialization in Maintenance Management. Director: Iván Darío Gómez Lozan. MSc

Introducción

En la planta elevadora Gibraltar se requiere optimizar los planes de mantenimiento ya que se tiene unos antecedentes de registros históricos de mantenimiento donde no se presenta codificación de los modos de falla y por consiguiente no hay una clasificación de fallas no se han definido las frecuencias óptimas para implementar las tareas de mantenimiento no hay una actualización reciente de los activos instalados por renovación y se encuentra una clasificación de niveles de criticidad en obsolescencia de los activos no hay actualización de los planes de mantenimiento y se encuentran demasiadas fallas recurrentes en los equipos. No se tiene un análisis de puntos débiles. Se requiere actualizar las actividades de mantenimiento que no agregan valor a los activos además no se ha construido un método de análisis de falla para su análisis recomendaciones y resultados, no hay un sistema organizado para gestionar y operar el mantenimiento, no hay una táctica definida y se presenta confusión en la definición de las diferentes clases de mantenimiento como , Predictivo, Preventivo correctivo para realizar las tareas de mantenimiento A raíz de este estudio se requiere elaborar una metodología para generar tareas de mantenimiento proactivas y poder organizar y documentar los históricos de mantenimiento, para los sistemas de la planta elevadora Gibraltar a partir de la aplicación de la herramienta de análisis FMECA.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Implementar un plan de mantenimiento estratégico basado en FMECA para mejorar la eficiencia y operatividad en la planta elevadora Gibraltar.

1.2. Objetivos específicos

Realizar el estudio de criticidad y riesgo de los equipos de la planta Gibraltar con el fin de priorizar el plan de mantenimiento.

Actualizar el catálogo de los modos de falla de los equipos con alta criticidad de acuerdo con la norma ISO 14224.

Implementar una estrategia de ingeniería de confiabilidad con el fin de clasificar y organizar los modos y causas de falla.

Actualizar el plan de mantenimiento con el fin de optimizar la vida útil de los activos y validar en el grupo de operación y mantenimiento para su implementación.

2. Justificación

Al utilizar la herramienta de confiabilidad FMECA, se pueden identificar y examinar los problemas más comunes de la planta. Esta herramienta permite analizar la organización y la selección de sistemas, identificando los equipos que el personal de reparación de la empresa deberá reparar. Con esta guía, se analizarán los diferentes sistemas que componen las partes manejables de la planta y se elaborará un formulario FMECA para elaborar planes de mantenimiento y soluciones para las diferentes formas en que los equipos analizados pueden fallar; una vez realizada la investigación y conocidos los resultados, se pueden identificar con mayor precisión las partes más importantes de cada sistema analizando cómo fallan y qué sucede cuando lo hacen, la puntuación de riesgo del estudio FMECA se utilizará para identificar las partes más importantes de cada equipo. Finalmente, se procederá a la creación de un plan de mantenimiento preventivo para los equipos analizados.

Con los resultados obtenidos, se busca mejorar la confiabilidad de los activos instalados en la planta, optimizar las tareas proactivas del mantenimiento, y minimizar el impacto de riesgos asociados a daños al medio ambiente y al personal que habita cerca de la planta. Este diseño de estrategias culminará en la creación de un plan piloto de mantenimiento que podrá ser implementado en todas las plantas elevadoras y de agua potable de la EABB.

2.1. Ubicación de la Estructura de Captación y de Entrega de la Estación de Bombeo

La estación de Bombeo Gibraltar pertenece a la zona 5 de la Empresa De Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, EAB-ESP, y está ubicada en la localidad de Kennedy, en la calle 42gs con carrera Carera 100B, siendo sus coordenadas 88383,47 Este y 105762.74 Norte

Figura 1

Planta Gibraltar



Fuente: Google Maps (2025)

Figura 2

Panorámica Planta Gibraltar



Fuente: Google Maps (2025)

La planta Gibraltar funciona para descargar las aguas combinadas que llegan de los sectores de Kennedy occidental y del canal de aguas lluvias Cundinamarca, La estación elevadora Gibraltar se compone de:

Estructura de entrada de aguas lluvias proveniente del canal Cundinamarca.

Estructura de control de nivel.

Estructura de entrada de aguas residuales.

Canal colector de aguas lluvias y negras con salida de las cámaras de succión.

4 bombas tipo tornillo, 3 unidades operando y 1 unidad en stand by

4 motores siemens con una potencia de 230 KW 1800 RPM

4 reductores flender n2:26.91/min

2 bombas sumergibles con capacidad individual de 500l/s c/u.

3 bombas Thompson de motor diésel

Sala de máquinas y de control remoto.

Canal de descarga de las aguas del rio Bogotá

Cuenta con una red de 34.5 kv y los transforma a 460 va

Capacidad total de la estación de bombeo:

La operación de la estación está dada de la siguiente forma:

En condiciones normales de operación las 3 unidades de bombeo tipo tornillo trabajaran con su caudal nominal, cada bomba tiene una capacidad de 1340 l/s con los sets points establecidos preliminarmente por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

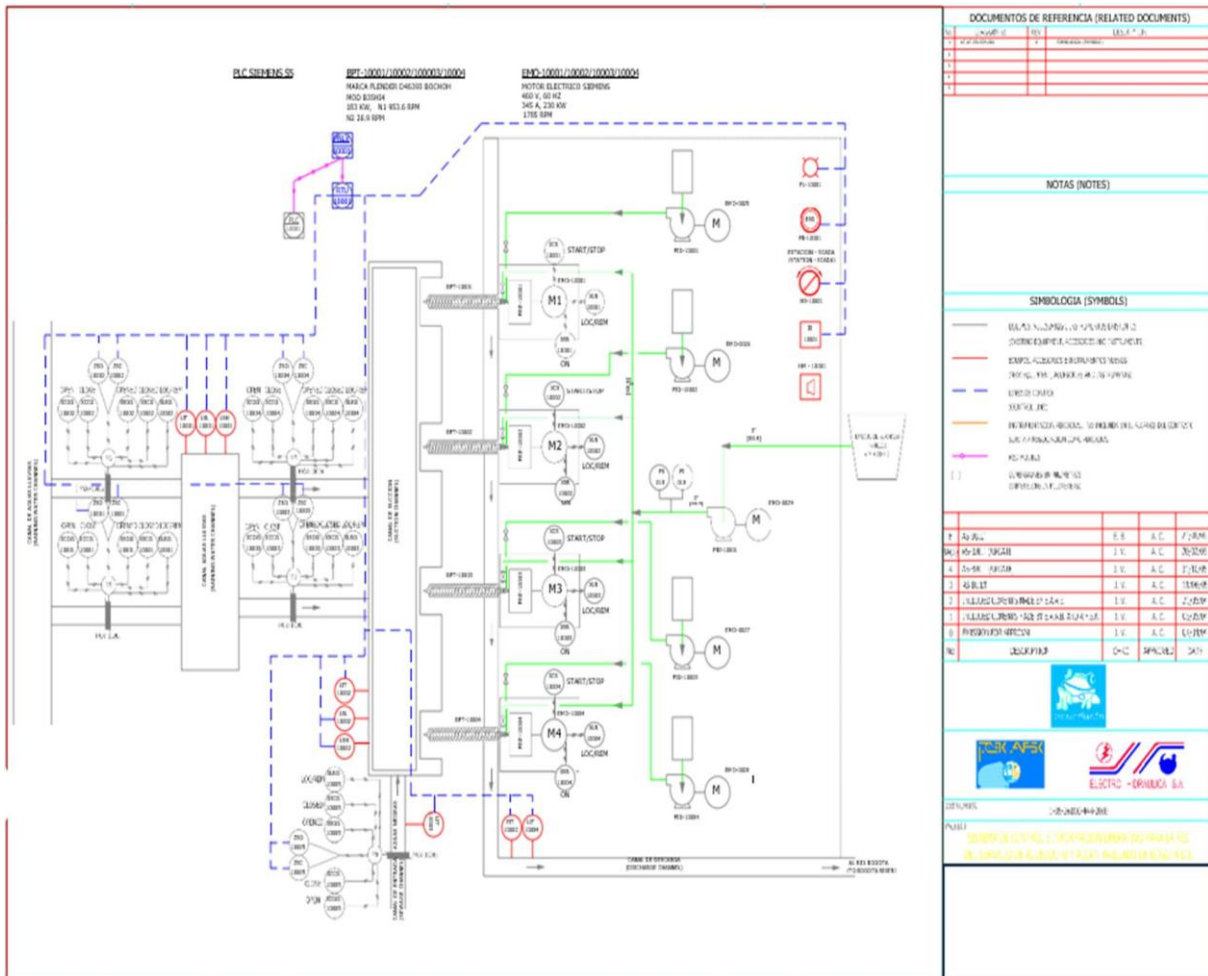
La capacidad total de la estación:

1340 l/s x 3 unidades tornillo = 4,020 l/s aprox.

Actualmente, la estación de bombeo opera a su máxima capacidad, aproximadamente 4,020 L/s. Sin embargo, su capacidad de operación varía en función de la temporada de lluvias.

Figura 3

P&DI Planta Gibraltar (EABB)



Nota: Proceso de gestión del mantenimiento aplicando el análisis de falla y sus efectos y criticidad, AMFEC

2.2. Análisis de Modo De Falla, Efectos y Criticidad (FMECA)

El enfoque se basa en desarrollar una metodología para crear planes de mantenimiento para los sistemas de la planta elevadora Gibraltar, utilizando la herramienta de análisis FMECA.

Primero se elaborará una lista de las partes de la planta para seleccionar los sistemas a estudiar. Los criterios se utilizarán para elegir las herramientas con las que trabajará el personal de reparación de la empresa. Con esta guía, se examinarán los diferentes sistemas que componen las partes manejables de la planta y se elaborará un formulario FMECA para ayudar a elaborar planes de mantenimiento y soluciones para las diferentes formas en que el equipo en estudio puede fallar. Tras realizar una investigación adecuada y obtener los resultados, es más fácil determinar qué partes de cada sistema son las más importantes al observar cómo fallan y qué sucede cuando lo hacen. Las partes más importantes de cada equipo se seleccionarán en función de la puntuación de riesgo que arroja el análisis FMECA. Por último, se elaborará un plan de mantenimiento regular para el equipo examinado.

Una forma de identificar riesgos es utilizar el Análisis de Modos de Fallo y Efectos (FMEA), para la planificación del mantenimiento centrada en la confiabilidad, esto suele ir acompañado de una calificación o evaluación de la importancia del riesgo; este método nos ayuda a comprender completamente el sistema, incluyendo su funcionamiento y cómo pueden ocurrir fallas en las partes que lo componen. Las acciones sugeridas por un FMECA o AMFEC se conocen como tareas o acciones de mantenimiento, esto permite crear un plan de reparación completo añadiendo factores de riesgo a cada objeto o equipo examinado y ayuda a determinar cómo el plan de mantenimiento afectará el riesgo del edificio; en el caso de las herramientas más peligrosas, también garantiza que se siga el plan de reparación, lo cual beneficia a las personas, al medio ambiente, al trabajo y al propio edificio.

El proceso FMECA o AMFEC consta de diferentes pasos, estos pasos incluyen la definición del propósito del diseño, un análisis funcional, la identificación de posibles modos de falla, la determinación de qué sucedería si ocurrieran estas fallas, la clasificación de los riesgos

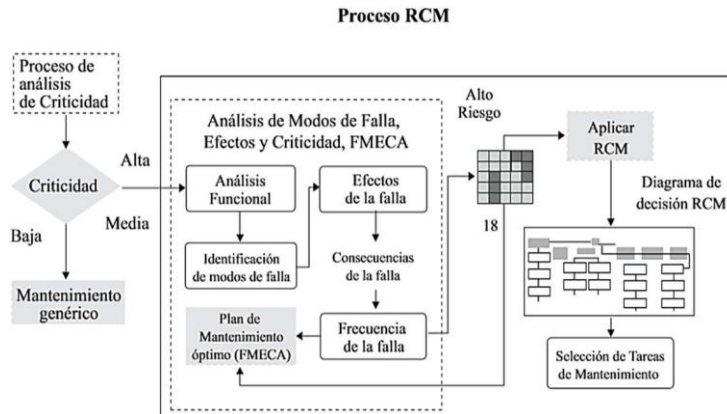
según su importancia y la formulación de sugerencias. Mediante el uso del FMECA o AMFEC, se identificaron los modos de falla que representan las mayores amenazas para el edificio, considerando los riesgos para las personas, la producción y la infraestructura, existe un proceso exhaustivo para seleccionar las tareas de mantenimiento a realizar para los modos de falla con mayor riesgo, los modos de fallo con riesgos intermedios o bajos se gestionan de forma más general. Con este proceso, el mantenimiento puede centrarse en las partes del edificio donde puede tener un mayor impacto en su seguridad y fiabilidad, además, optimiza el uso de recursos, ya que la planificación del mantenimiento se basa en los modos de fallo detectados en el análisis funcional, en lugar de centrarse en equipos específicos, en otras palabras, el plan se basa en los modos de fallo, en lugar de en equipos individuales.

Etapas:

Redefinición del objetivo de diseño, análisis funcional, identificación de modos de falla, evaluación de los efectos de las fallas, priorización del riesgo y sugerencias. Es importante destacar que, en este estudio, no se pretende describir o enumerar las tareas de mantenimiento detectadas, sino que se enfoca principalmente en el análisis de los modos de falla, que constituye el elemento central de todo el proceso, se debe resaltar que, en el caso de la evaluación de la criticidad del AMFEC o FMECA, esta se refiere al riesgo, con el propósito de clasificar los modos de falla según su criticidad, para identificar y priorizar los escenarios de mayor riesgo, desde el más crítico hasta el menos crítico.

Figura 4

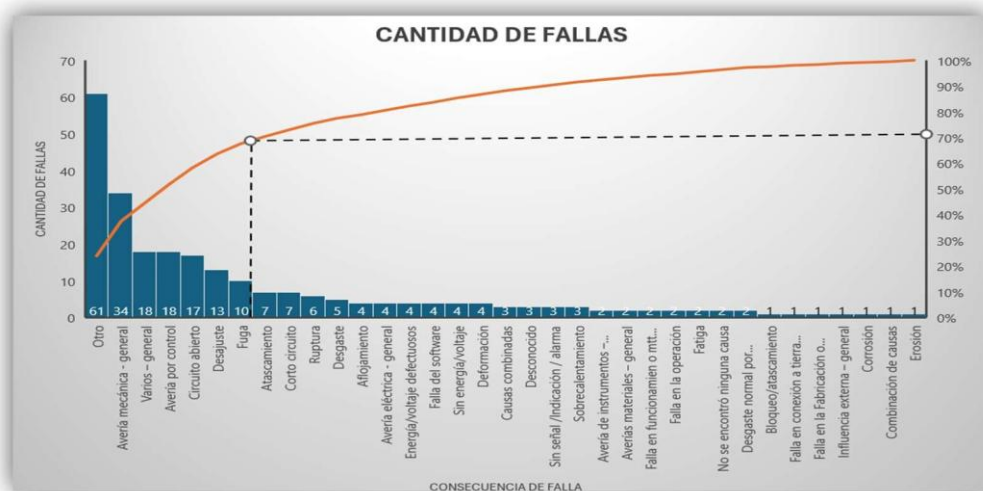
Proceso RCM



Fuente: análisis de modo de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación de mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. Tecnología, ciencia, educación, 25(1), 15-26

Con el diagrama de Pareto se evidencia que las fallas no detalladas y llamadas como otros, son las encargadas de una gran cantidad de fallas en el sistema, con este tipo de análisis es posible identificar cuáles son las fallas más recurrentes dentro del sistema y cuáles son los equipos más críticos.

Figura 5 Curva de Pareto cantidad de fallas estación elevadora de aguas residuales



Fuente: Autoría propia.

3. Marco Conceptual

Con esta investigación se adquiere las suficientes habilidades para implementar manejar y optimizar las diferentes tareas de mantenimiento con el correcto manejo de la herramienta de confiabilidad FMECA con los resultados de esta investigación se mejorara los indicadores de gestión del mantenimiento En la planta elevadora Gibraltar transmitir e implementar una ingeniería de confiabilidad en todas las estaciones elevadoras y estaciones de bombeo a partir de la correcta actualización de los planes de mantenimiento con el fin de aumentar el ciclo de vida de los activos electromecánicos de la EABB, el compromiso con esta investigación es identificar los problemas más relevantes que se están presentando en la planeación y ejecución del mantenimiento, implementado una ingeniería de confiabilidad que nos permita solucionar , organizar y entregar un indicador confiable en la ejecución del mantenimiento con el desarrollo de esta investigación se va a entregar una estrategia de mantenimiento que contenga normatividad clasificación de sistemas criticidad de activos, modos de falla, frecuencias, métodos de análisis de fallas, análisis de riesgos y resultados para diseñar la estrategia más acertada para el correcto funcionamiento de la planta con la implementación de la herramienta de confiabilidad el área de mantenimiento se encamina a aumentar el tiempo medio entre fallas MTBF y se va a reducir el MTTR Es más, específico en que de la teoría se va a usar en su proyecto: FMECA, RCM, etc.

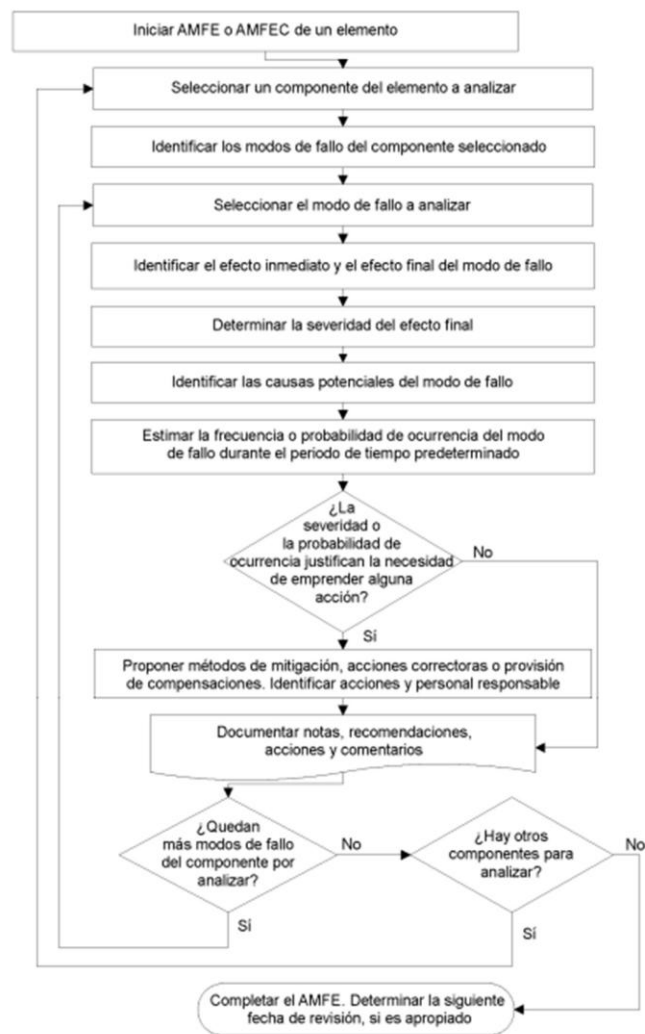
El FMECA (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis) es un análisis de los modos de fallo, sus efectos y su criticidad, es una herramienta utilizada para identificar posibles fallos en un sistema o proceso, evaluando las consecuencias de esos fallos y priorizando acciones correctivas. En la **planta elevadora de aguas residuales Gibraltar**, un FMECA puede ayudar a garantizar que el sistema de bombeo y otros componentes funcionen de manera eficiente,

minimizando el riesgo de fallos. Se debe llevar un procedimiento detallado para realizar el análisis

La Norma 60812 :2006 pág. 22 nos muestra un diagrama de flujo de cómo se realiza un análisis FMECA.

Figura 6

Diagrama de proceso



Fuente: EN 60812 (2006)

Pasos para elaborar un FMECA

1 .Definir los objetivos y el alcance del FMECA: determinar los sistemas y los componentes que se van a analizar luego se establecen los límites que se van a estudiar

2 Formar el equipo de trabajo.

Tras hablar con los ingenieros y técnicos de mantenimiento de la planta de Gibraltar, se elaboró una lista de los sistemas y modos de fallo que se revisarán para optimizar los planes de mantenimiento actuales. Esto ayudará a determinar qué sistemas, equipos y piezas son los más importantes para el proceso.

3 Desglosar el sistema o proceso.

Se desglosa el sistema en subsistemas equipos componentes modos de fallo y efectos de fallo

Tabla 1 *Desglose de sistema o proceso*

Nivel 1	Nivel 2	componentes	CODIGO ISO	Modos de falla	Efecto de falla
Planta elevadora Gibraltar	Sistema de bombeo	Motor Eléctrico	EM	Desgaste de los rodamientos	Lubricación inadecuada

Fuente: Autoría propia.

4 Identificar los modos de fallo

Para cada modo de fallo se analiza cada componente y se listan los posibles modos de fallo la manera en que cada parte puede fallar en estos modos de fallo se incluyen fallas mecánicas, eléctricas y electrónicas.

5. Identificar los mecanismos de fallo

Se evalúa las consecuencias o efectos de cada fallo y se determina los posibles efectos que tendrán sobre el sistema.

6. Determinar la criticidad de cada modo de fallo

Para cada modo de fallo se realiza una evaluación de severidad, probabilidad y detectabilidad Severidad (S) que tan grave es el impacto del fallo se califica generalmente de una escala de 1 a 10. Probabilidad (P) que tan probable que ocurra este fallo también se califica de una escala de 1 a 10.

Detectabilidad(D) que tan fácil es detectar el modo de fallo antes de que cause un problema significativo se procede a evaluar la criticidad mediante la fórmula: $RPN = S \cdot P \cdot D$

RPN (número de prioridad de riesgo) este valor permite clasificar los modos de fallo según su gravedad los modos de fallo con mayor RPN deben recibir atención prioritaria

De acuerdo con el proceso de elevar y descargar aguas residuales y combinadas en la planta Gibraltar y con la socialización donde participaron los técnicos operadores de planta y los ingenieros de mantenimiento se procedió a evaluar los impactos de los modos de fallo de los componentes evaluados en el FMECA

Las clasificaciones de gravedad, ocurrencia y detección se basaron en escalas predefinidas que reflejan los criterios y estándares del sistema de elevación y descarga de la planta elevadora Gibraltar. También Se Pueden utilizar las escalas existentes de las directrices FMEA, como las de AIAG o SAE, o desarrollar nuestras escalas predefinidas en el proceso, escalas que se adapten a la necesidad y contexto operacional. Las escalas deben ser claras, coherentes y objetivas, y deben ser acordadas por el equipo de mantenimiento y otras partes interesadas. Se utilizaron herramientas como la lluvia de ideas, las listas de comprobación, los datos históricos de fallos extraídos de SAP PM, las pruebas o el juicio de expertos para asignar calificaciones a cada modo de fallo.

Evaluación del riesgo de falla

Se aplicó la metodología del FMCA, donde se identificaron los modos de falla, se evaluaron las causas y se procede a evaluar la criticidad mediante la fórmula:

$$RPN= S \times O \times D$$

Donde:

F (frecuencia): probabilidad de la ocurrencia de la falla.

S (severidad): impacto de la falla en la operación.

D (detectabilidad): capacidad de detectar la falla antes de que ocurra un evento crítico.

3.1. Definición de los Rangos de acción

Severidad: Se evalúa en una escala del 1 al 10, donde 1 representa una severidad baja y 10 indica la máxima severidad. En la siguiente tabla se especifican los criterios utilizados para definir cada nivel de severidad.

Tabla 2 Severidad

Rango	Nivel de Severidad	Descripción del Impacto
1 - 2	Muy Bajo	Sin impacto en la operación, y seguridad. No afecta la prestación del servicio
3 - 4	Bajo	Impacto leve en el rendimiento del sistema, posible disminución de la eficiencia de bombeo, sin afectar la población y la seguridad.
5 - 6	Moderado	Pérdida parcial o total de la función de un equipo crítico, requiere intervención inmediata. Puede afectar la población.
7 - 8	Alto	Falla severa que interrumpe el servicio en una zona, afectando a la comunidad. Puede generar reboses, contaminación o riesgo ambiental.
9 -10	Muy Alto	Peligro crítico para la seguridad del personal, daño estructural o colapso del sistema. Parada total de la estación de bombeo con impacto grave en la población

Fuente: Autoría propia.

Frecuencia: Se evalúa en una escala del 1 al 10, donde 1 representa una frecuencia baja y 10 indica la máxima frecuencia. En la siguiente tabla se especifican los criterios utilizados para definir cada nivel de frecuencia.

Tabla 3*Frecuencia*

Rango	Nivel de Frecuencia	Descripción
1-2	Muy Bajo	Ocurrencia excepcional, menos de una vez cada dos años. No se ha registrado en el historial de mantenimiento.
3-4	Bajo	Ocurre rara vez, aproximadamente una vez al año. Puede registrarse en inspecciones, pero no afecta la operación.
5-6	Moderado	Se presenta con cierta regularidad, cada seis meses. Puede generar intervenciones programadas sin impacto crítico.
7-8	Alto	Falla frecuente, ocurre aproximadamente una vez al mes. Impacta el desempeño del sistema y requiere mantenimiento correctivo.
9-10	Muy Alto	Ocurre muy frecuentemente, semanalmente o más. Riesgo alto de interrupción del servicio y afectación a la operación.

Fuente: Autoría propia.

Detectabilidad: Se evalúa en una escala del 1 al 10, donde 1 representa una efectividad baja y 10 indica la máxima efectividad. En la siguiente tabla se especifican los criterios utilizados para definir cada nivel de detectabilidad.

Tabla 4*Detectabilidad*

Rango	Nivel de Detección	Descripción
1-2	Muy Bajo	Muy fácil de detectar. Sistemas automatizados de monitoreo y alarmas en tiempo real.
3-4	Bajo	Fácil de detectar. Inspecciones regulares permiten la identificación temprana de la falla.
5-6	Moderado	Moderadamente fácil de detectar. Requiere monitoreo manual o análisis de tendencias en parámetros operativos.
7-8	Alto	Difícil de detectar. Se necesita una prueba o análisis específico para su identificación.
9-10	Muy Alto	Muy difícil de detectar. La falla solo se identifica después de que ocurre, sin señales previas.

Fuente: Autoría propia.

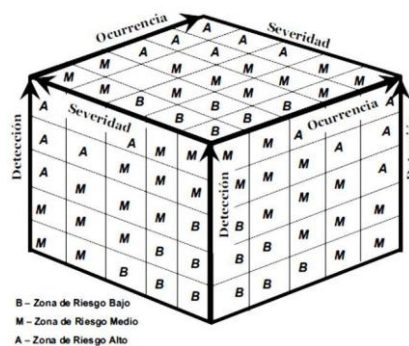
Para definir estos rangos, se realizaron reuniones técnicas con la parte operativa de la planta que incluyo Ingenieros de Confiabilidad, Técnicos, Seguridad, operadores de la planta también se tuvo en cuenta los registros históricos de fallas, características de los equipos y el impacto en la continuidad del servicio. Este enfoque permite una clasificación objetiva de los riesgos y facilita la priorización de acciones correctivas.

Una vez definido los criterios de severidad, frecuencia y detectabilidad se proceden a definir los valores del RPN (número prioritario de riesgo). Luego de definir el valor de RPN para cada componente podemos determinar el análisis de riesgo y criticidad de equipo y de esta manera dar prioridad a los equipos que cuenten con un valor de RPN, criterios de RPN se definieron como se muestran en la siguiente tabla.

Después de realizar la evaluación del RPN se procede a desarrollar las acciones preventivas o correctivas a los equipos con un RPN muy alto se deben definir las tareas de mantenimiento para reducir la probabilidad de ocurrencia o mejorar la capacidad de detección después de implementar las acciones se debe reevaluar los sistemas analizados.

Una vez se establece la matriz de prioridad se da curso a las acciones correctivas y tareas proactivas con mayor nivel de criticidad, en su orden jerárquico (Mora ,2009).

Figura 7 Matriz de prioridad



Fuente: Mora (2009).

8. Documentar los resultados.

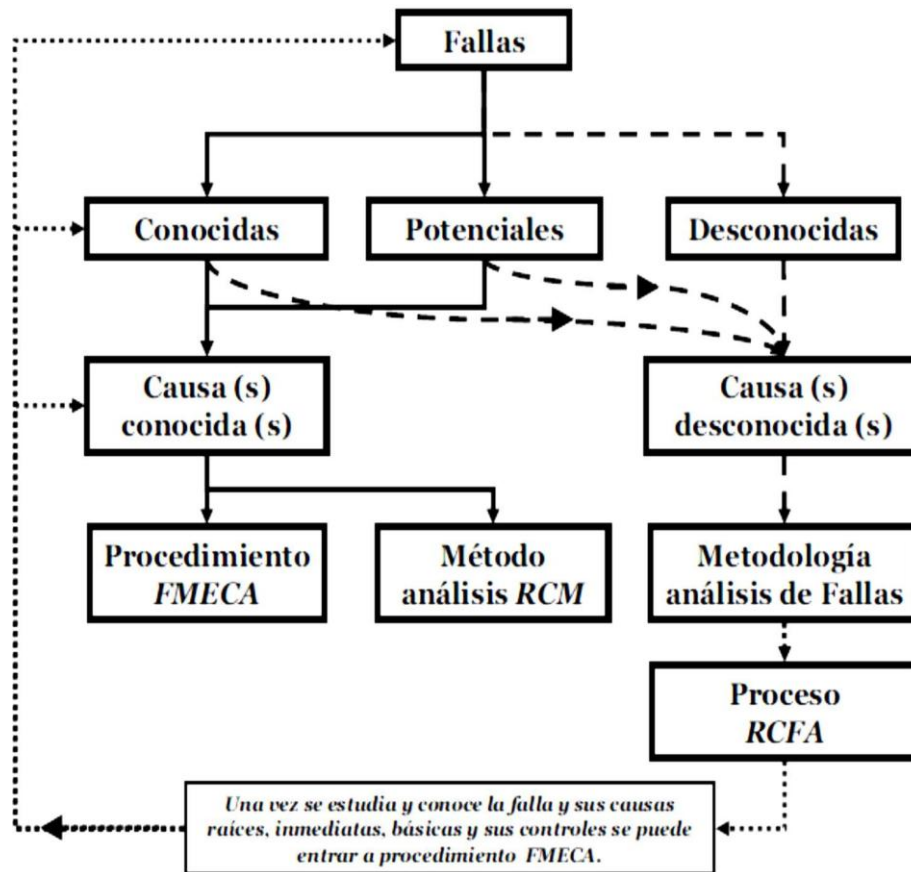
En el informe final de la herramienta FMECA se deben documentar los resultados que incluyen los modos de falla sus efectos la probabilidad ocurrencia y detectabilidad y el RPN también se debe tener en cuenta las recomendaciones para las tareas de mantenimiento correctivas

Se debe actualizar el FMECA periódicamente especialmente si se introducen cambios en el proceso como renovaciones cambios de equipos que puedan afectar los modos de fallo de la filosofía de operación de la planta.

Las fallas recurrentes afectan de forma inmediata el proceso y/o el mantenimiento de la planta unos ejemplos de fallas más recurrentes se presentan en los rodamientos de los motores los sellos y los engranajes de los reductores, las interrupciones de la red de energía los sistemas de control y monitoreo

Después de analizar las fallas potenciales y el mecanismo de falla conocidas se procede a realizar el procedimiento del FMECA aplicación del FMECA y RCM según la falla y la causa Mora, (2009)

Figura 8 Diagrama de fallas



3.2. Aplicación de la metodología FMECA – Modos de falla Análisis de criticidad y efecto

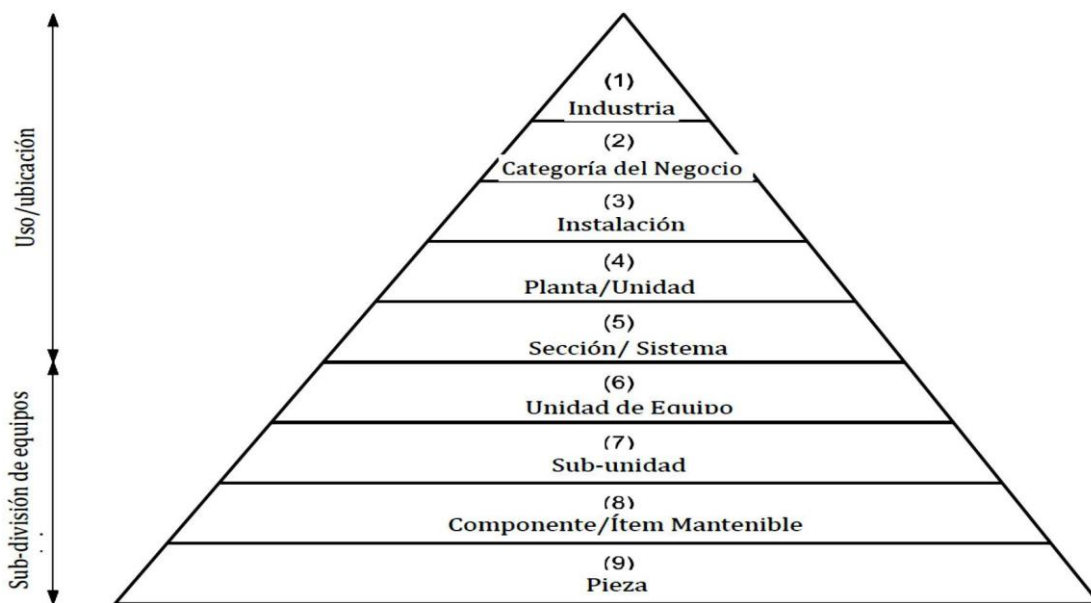
En este análisis de los modos de falla se utilizó el estándar internacional EN ISO 14224 este estándar nos proporciona una estructura bien definida para clasificar documentar y define unos códigos de falla y categorías para una mejor comparación y análisis. Para el desarrollo de esta metodología se tuvo en cuenta el siguiente orden:

Primero: en el sistema de gestión SAP PM se verifica la taxonomía y la clasificación del árbol de equipos en esta taxonomía encontramos la ubicación técnica de los equipos los diferentes tipos de sistemas.

Se debe tener en cuenta el concepto de taxonomía para jerarquizar los sistemas equipos componentes ítems mantenibles

La norma ISO-14224 define la Taxonomía como una clasificación sistemática de ítems basados en factores comunes como la ubicación el uso el proceso el equipo y la subdivisión de equipos.

Figura 9 Clasificación de la taxonomía con niveles taxonómicos



Fuente: ISO-14224

Tabla 5 Ejemplos de jerarquización del árbol de equipos

EAB	AL	SC	ZN05	DGIB	S-BOM
EMPRESA	PROCESO	SERVICIO	ZONA	PLANTA	SISTEMA

Fuente: Autoría propia

EAB-AL-SC-ZN05-DGIB-SBOM

EAB: Empresa de acueducto y Alcantarillado de Bogotá

AL: Red de alcantarillado

SC: Servicio al cliente

ZN05: Zona donde está ubicada la planta

DGIB: Nombre de la planta (Gibraltar)

SBOM: Sistema de Bombeo

Tabla 6 *Taxonomía del sistema de bombeo con sus respectivos niveles de jerarquía*

Taxonomía				
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
Planta	Sistema	Componente	FUNCION PRINCIPAL	FALLA FUNCIONAL
Planta Gibraltar	Sistema de bombeo	Motor eléctrico	Transformar energía eléctrica a energía mecánica con una potencia de 308 hp a 1785 rpm y un voltaje de 460 v	Incapacidad de transformar la energía eléctrica en mecánica a una potencia de 308 hp a 1785 rpm y a una tensión de 460 v

Ejemplo de un árbol de equipos según la norma ISO 14224

NIVEL 1: PLANTA

NIVEL 2: SISTEMA QUE SE VA A ANALIZAR

NIVEL 3 COMPONENTE

NIVEL 4: FUNCION PRINCIPAL

NIVEL 5: FALLA FUNCIONAL

3.3. Explicación del árbol de equipos

Nivel 1: representa el nivel más alto que se va a evaluar del proceso

Nivel 2: se divide en los sistemas funcionales como el sistema de bombeo sistema eléctrico sistema de canales, sistema de supervisión y control

Nivel 3: son los equipos principales que conforman cada sistema (componentes)

Nivel: 4 Función principal para la cual fue diseñado el equipo

Nivel 5: falla funcional es la pérdida total o parcial o la incapacidad de realizar la función principal

El árbol de equipos nos permite realizar una estructura planificada de la gestión del mantenimiento

La norma ISO 14224 entrega unas mejoras para facilitar el análisis de falla y confiabilidad (RCM, FEMECA) ayuda a optimizar la gestión de repuestos de una forma rápida y confiable identificando partes críticas

Facilita la organización estructurada de la gestión del mantenimiento

Segundo: definir las funciones principales de los equipos que se encuentran dentro de los sistemas más importantes que van a ser evaluados por los equipos interdisciplinarios encargados del desarrollo de la metodología Fmeca a continuación se definen las funciones de los componentes que integran el sistema principal de bombeo de la planta elevadora Gibraltar.

1 sistema de bombeo:

bomba de tornillo elevar aguas residuales y/o lluvias a una rata de 1340L/S

Reductor de velocidad proporcionar el torque necesario a la bomba de tornillo con una velocidad

De 26,9 rpm con una potencia de 183 Kw

Relé de protección: proteger controlar y monitorear el motor eléctrico de 308 hp de las fallas eléctricas y sobre cargas

Arrancador Celda: alojar los dispositivos de protección control y maniobra necesarios para el arranque, y operación del motor

Arrancador Suave: controlar la tensión de arranque y parada del motor, reduciendo la corriente de arranque y evitando golpes mecánicos en la unidad de bombeo

Sistema Eléctrico:

Planta de emergencia: suministrar energía de respaldo a 1.53 kva y 480 V

Transferencia Automática: cambiar automáticamente la fuente de alimentación del sistema eléctrico entre la red principal y el generador de emergencia en caso de una falla o interrupción del suministro de 460 vac

Banco de Condensadores: Arreglar la potencia de reacción del sistema eléctrico para aumentar el factor de potencia, hacerlo más eficiente energéticamente y reducir las pérdidas en la red.

Banco de baterías: mantener y/o garantizar 125 vdc cuando no hay alimentación directa del cargador a las cargas esenciales

Transformador de Potencia: transformar energía eléctrica de 34,5kv a 480 v

Celda de medida +S1H3: proporcionar una medición directa de las magnitudes eléctricas en el sistema de media tensión (MT) DE 34.5 kv permitiendo el monitoreo y el control del consumo de energía

Relay FP VARLOGIC ELDA + n1: controlar y regular el factor de potencia del sistema eléctrico de 460 vac mediante la gestión automática del banco de condensadores

Medidor multifuncional celda medir, monitorear y registrar los parámetros eléctricos en el sistema de control motores (CCM), DE 460 VAC ayudando a mejorar la eficiencia energética

Sistema supervisión y control:

PLC sistemas de control y SCADA: automatizar, recibir, procesar, transmitir y comunicar las señales de los dispositivos de campo

Fuentes de alimentación: convertir la tensión de entrada de ca en una tensión de salida estable de corriente continua

Switch de comunicaciones: conectar los dispositivos de la red local y gestionar el tráfico de datos

Sistema de líneas de flujo:

Actuador: proporcionar la fuerza necesaria para mover la compuerta de entrada de aguas lluvias por medio de fuerza motriz eléctrica (Motor Eléctrico)

Limpia rejillas eléctrico: recoger transportar y arrojar en modo automático los residuos sólidos que se encuentren en el canal de aguas lluvias

Compuerta de canales: detener y controlar el flujo de los canales de agua residuales y/o de lluvias

Figura 10 Equipos instalados en el sistema de canales actuador Limitorque

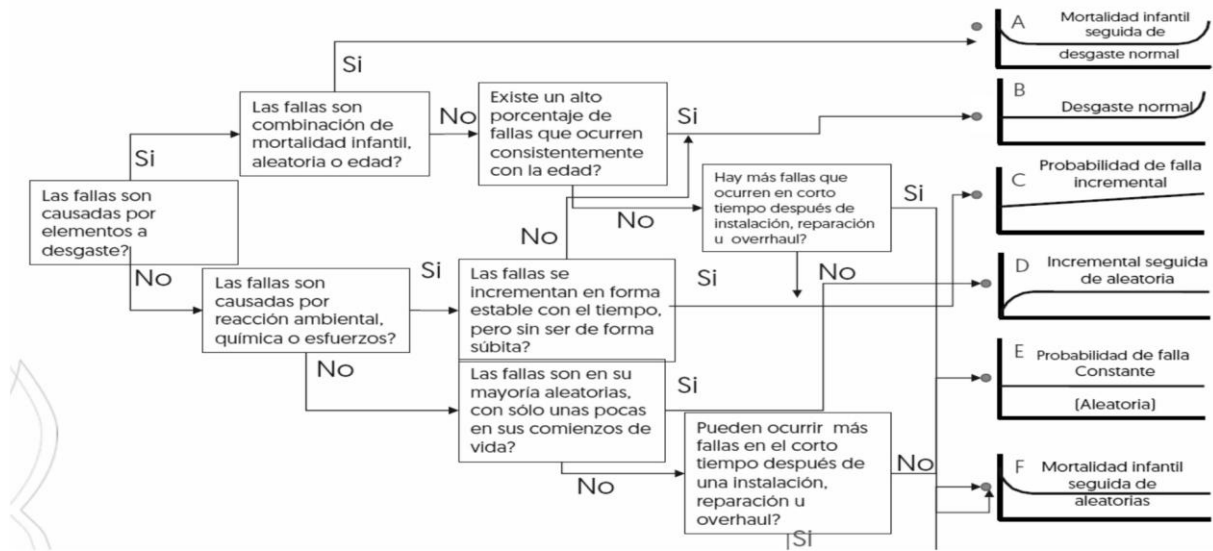


Fuente: Autoría propia.

3 Definir las fallas Funcionales: son todos los daños de las condiciones operativas que impiden al sistema o equipo cumplir con las funciones para lo cual fue diseñado

Figura 11

Pgmanten_ integridad y confiabilidad



Fuente: Profesor Leonardo pinilla Rodríguez UIS

Ejemplo de una falla funcional del equipo limpia rejillas hidráulico analizado en el sistema de líneas de flujo de la planta Gibraltar.

Tabla 7

Ejemplo de una falla funcional del equipo limpia rejillas hidráulico

EQUIPO	Función principal	Falla funcional
limpia rejillas hidráulico	Recoger transportar y arrojar en modo automático los residuos sólidos que se encuentren en el canal de aguas lluvias	Incapaz de recoger transportar y arrojar en modo automático los residuos sólidos que se encuentren en el canal de aguas lluvias
Transmisor de nivel	Medir transmitir y controlar nivel en el canal de entrada	Incapaz de medir transmitir y controlar nivel en el canal de entrada

Fuente: Autoría propia.

4: Modos de Falla: es cualquier evento físico que causa una falla funcional

Se identificaron modos de fallo y se propusieron ideas. Estas se agruparon para cumplir con la norma ISO 14224. Esto facilita la estandarización de la información sobre fallos, el seguimiento de eventos y la gestión de registros más precisos en los sistemas de gestión de mantenimiento

La norma ISO 14224

Métodos de detección de fallas: son las actividades, rutinas inspecciones diarias que realizan los técnicos de las diferentes disciplinas del mantenimiento, operadores para descubrir las fallas la información realizada es muy importante para distinguir las fallas encontradas por la acción de un plan de mantenimiento o la inspección visual la norma ISO-14224 Tabla B.4 nos proporciona 10 métodos para la detección de fallas estos métodos son muy relevantes para tener en cuenta en la planeación programación y ejecución del mantenimiento estas acciones periódicas nos lleva a una forma rápida de encontrar una falla y con la intervención oportuna del grupo de mantenimiento se pueden atacar estas fallas para que no se vuelva una falla potencial o crítica estos métodos de detección de fallas son muy importantes para el personal de mantenimiento que interviene las fallas en un proceso el departamento de planeación del mantenimiento debe documentar estos métodos ya que son una herramienta muy potente para ubicar detectar las fallas.

Tabla 8 Método de detección

Número	Notación ^a	Descripción	Actividad
1	Mantenimiento periódico	Falla descubierta durante el mantenimiento, reemplazo o reacondicionamiento preventivo de un ítem al ejecutar el programa de mantenimiento preventivo.	Actividades Programadas
2	Pruebas funcionales	Falla descubierta al activar una función prevista y comparar la respuesta contra un estándar predefinido. Esto es un método típico de detección de fallas ocultas.	
3	Inspección	Falla descubierta durante la inspección planeada, p.ej. inspección visual, pruebas no destructivas	
4	Monitoreo periódico de condiciones ^b	Fallas reveladas durante el monitoreo planeado y programado de condiciones de un modo de falla predefinido, ya sea manual o automático, p.ej. termografía, medición de vibraciones, análisis de aceite, etc.	
5	Pruebas de presión ^c	Falla observada durante pruebas de presión	
6	Monitoreo continuo de condiciones ^b	Fallas reveladas durante el monitoreo continuo de condiciones de un modo de falla predefinido	Monitoreo continuo
7	Interferencia de producción	Falla descubierta debido a una interrupción, reducción etc. de la producción	Ocurrencias casuales
8	Observación casual	Observación casual durante las revisiones rutinarias o casuales del operador, principalmente a través de los sentidos (ruido, olor, humo, fugas, apariencia, etc.)	
9	Mantenimiento correctivo	Falla observada durante mantenimiento correctivo	
10	Bajo demanda	Falla descubierta durante un intento de activar un equipo bajo demanda (ej. la válvula de seguridad no cierra tras la señal ESD; la turbina de gas no inicia bajo demanda, etc.)	Other
11	Otros	Otro método de observación y/o combinación de diferentes métodos	

Fuente: BS EN ISO 14224 (2016)

Tabla 9 Ejemplos de modos de falla de un componente con su función principal falla funcional y modo de falla (causa de falla)

id	FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL [Pérdida de Función]		MODO DE FALLA [Causa de la Falla]
1	Transferir agua desde el tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto	A	Incapaz de transferir agua	1 2 3 4 5 6 7	Cojinetes atascados Impulsor suelto Impulsor trabado por un cuerpo extraño El cubo de acople falla por fatiga Motor quemado Válvula de ingreso trabada en posición cerrada ...etc.
		B	Transferir menos de 800 litros por minuto	12 3	Impulsor gastado Línea de succión parcialmente bloqueada ...etc.

Fuente: Mantenimiento centrado en confiabilidad edición en español John-Moubray

Tabla 10 Ejemplos de modos de fallas analizados en la planta Gibraltar

EQUIPO	CODIGO ISO	MODO DE FALLA
MOTOR ELECTRICO	IM	Sobrecalentamiento corto circuito degradación del aislamiento

Fuente: Autoría propia.

Tabla 11 Ejemplos modos de falla Eléctricos**Tabla B.8 — Equipos Eléctricos — Modos de falla**

Código de modo de falla	Descripción	Ejemplos	Código de clase de			
			UP	PT	FC	SG
AIR	Lectura anormal en instrumento	Error en nivel de aceite, falsa alarma, indicación errónea en instrumento		X	X	
BRD	Parada	Daños graves			X	
DOP	Operación retrasada	Retraso en respuesta a comandos			X	
ELU	Fuga externa - medio de suministro	Fuga de aceite, lubricante, agua de enfriamiento		X	X	X
ERO	Producción errática	Oscilación, variación, inestabilidad	X		X	
FOF	Error en frecuencia de salida	Frecuencia equivocada/oscilante	X			
FOV	Error en voltaje de salida	Voltaje de salida equivocado/oscilante	X	X		
FTC	Falla en cierre bajo demanda	El disyuntor de circuito/fusible de conmutación/desconector/bus tie no cierra bajo demanda				X
FTF	Falla en funcionamiento bajo demanda	No arranca bajo demanda, o no responde tras la activación/señal, o no responde a comandos de entrada Función auxiliar, subsistema o dispositivo de monitoreo o control no opera	X	X	X	
FTI	Falla de funcionamiento previsto	Respuesta inesperada Dispositivo de protección / disyuntor de circuito/ interruptor no resuelve una falla en el circuito			X	X
FTO	Falla en abrir bajo demanda	Disyuntor de circuito/fusible conmutador/desconector/bus tie no abre bajo demanda				X
FTR	Falla de regulación	No controla la carga, mala respuesta a retroalimentación			X	
HIO	Alta producción	Exceso de velocidad/ producción sobre nivel aceptado			X	
INL	Fuga interna	Oil leakage, Leakage internally process or utility fluids		X	X	
LOO	Baja producción	Rendimiento/producción menor del nivel aceptado			X	
NOI	Ruido	Ruido anormal				X
OHE	Sobrecalentamiento	Piezas de la máquina, escape, agua de enfriamiento	X	X	X	
OHE	Sobrecalentamiento	Temperatura interna demasiada alta				X
OTH	Otro	Modos de falla no cubiertas anteriormente	X	X	X	X
PDE	Desviación de parámetros	Parámetro monitoreado excede los límites, p.ej. alarma alto/bajo	X	X	X	
PLU	Taponamiento/atascamiento	Tuberías obstruidas		X		

Fuente: Modos de falla tabla B:8 ISO 1422 (2016).

5 Efectos de Falla: es el impacto que pueden provocar los modos de falla en los componentes de del sistema o proceso del análisis

La norma española 60 812:2006 define el efecto de fallo como la consecuencia de un modo de fallos en términos de la operación función o estado del elemento y la norma ISO-14224 define el Mecanismo de Falla: como los procesos físicos o químicos que dan origen a la falla los códigos de los mecanismos de falla se relacionan en las siguientes categorías generales de tipos de falla

A: fallas mecánicas

B: fallas de material

C: fallas de instrumentación

D: fallas eléctricas

F: influencia externa

Tabla 12 *Ejemplo de mecanismo de falla evaluado en el sistema de bombeo componente reductor de velocidad, bomba de tornillo*

Componente	Modo de falla	Mecanismo de falla
Reductor de velocidad	Fractura o rotura de dientes	Contaminación por partículas en el aceite
Bomba de tornillo	Fatiga de elementos rodantes	Contaminación por suciedad o humedad carga excesiva o mal distribuida instalación incorrecta o falta de mantenimiento
Relé de protección	Configuración incorrecta de parámetros	Error humano en la introducción de datos valores fuera de rango

Fuente: Autoría propia.

Tabla 13 Ejemplo de Mecanismos de falla Norma ISO 14224

Tabla B.2 — Mecanismo de falla

Mecanismo de falla		Subdivisión del mecanismo de falla		Descripción del mecanismo de falla
Número de código	Notación	Número de código	Notación	
1	Falla mecánica	1.0	General	Falla relacionada a algún defecto mecánico, pero donde no se conocen detalles mayores.
		1.1	Fuga	Fugas externas e internas, ya sean de líquidos o gases: si el modo de falla al nivel del equipo se codifica como "fuga", se debe utilizar un mecanismo de falla orientado a la causa siempre que sea posible.
		1.2	Vibración	Vibración anormal: Si el modo de falla al nivel del equipo es "vibración", un mecanismo de falla orientado a la causa, la causa de la falla (causa raíz) debe ser registrado siempre que sea posible.
		1.3	Alineamiento/ espacio	Falla provocada por un espacio o alineamiento inadecuado.
		1.4	Deformación	Distorsión, flexión, abolladura, mellas, exceso de tensión, contracción, formación de ampollas, reptación, etc.
		1.5	Soltura	Desconexión, ítems sueltos.
		1.6	Atascamiento	Atascamiento, agarrotamiento, bloqueo por razones aparte de la deformación o problemas de alineamiento/espacio.
2	Falla de material	2.0	General	Falla relacionada a un defecto del material, pero donde no se conocen detalles mayores.
		2.1	Cavitación	Relevante para los equipos tales como las bombas y válvulas
		2.2	Corrosión	Todo tipo de corrosión, tanto húmeda (electroquímica) como seca (química)
		2.3	Erosión	Desgaste por erosión
		2.4	Desgaste	Desgaste abrasivo y adhesivo, p.ej. ralladuras, engrane, raspado, frotamiento
		2.5	Rotura	Fracturas, quebrantamientos, grietas
		2.6	Fatiga	Si la causa de la falla puede ser trazado a la fatiga, se debe utilizar este código.
		2.7	Sobrecalentamiento	Daños al material debido al sobrecalentamiento/ quemado
		2.8	Estallido	Ítem estallido, reventado, explosión, implosión, etc.
3	Falla de instrumentos	3.0	General	Falla relacionado al instrumento, pero donde no se conocen detalles mayores.
		3.1	Falla de control	Falta de regulación o regulación inapropiada
		3.2	Sin señal/ indicación/ alarma	Falta de señal/indicación/alarma esperada
		3.3	Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Señal/indicación/alarma inapropiada en relación al proceso real. Puede ser falsa, intermitente, oscilante, arbitraria
		3.4	Desajuste	Error de calibración, cambio de parámetros
		3.5	Error de software	Falta de control/monitoreo/operación, control/monitoreo/operación inapropiada debido a error de software
		3.6	Falla de causa común/modo común	Varios instrumentos fallaron simultáneamente, p.ej. detectores de incendio y gas redundantes; también fallas relacionadas a una causa común.

Fuente: Autoría propia.

6 Evaluación de criticidad del RPN

Como se describió en los pasos anteriores la alimentación de la plantilla FMECA se realizó con la concertación de las lluvias de ideas de las personas involucradas en el mantenimiento y operación de la planta Gibraltar el siguiente paso ya identificados los modos de falla y evaluados los mecanismos de falla procedemos a evaluar la criticidad mediante el número de prioridad de riesgo con la formula $RPN = S \times O \times D$ en la evaluación de los rangos se tuvo en cuenta aspectos importantes como los impactos a la población la frecuencia (ocurrencia) de la falla y la facilidad de detección de las fallas.

Tabla 14

Ejemplo de algunos equipos con criticidad alta

NIVEL 2	FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	MECANISMO DE FALLA	NPR	
TRANSFERENCIA AUTOMATICA	cambiar automáticamente la fuente de alimentación del sistema eléctrico entre la red principal y el generador de emergencia en caso de una falla o interrupción del suministro de 460 vac	incapaz de hacer el cambio automático entre la fuente de alimentación de la red principal y el generador de emergencia cuando se presente una falla en la red de 460 vac	bypass interno	Falla en la activación del bypass	7	4	8	Problema en la señal de activación, contactos sucios o desgastados, falla en el controlador	224
			cable sumergible y conector hermético	No activa la bomba	7	5	7	Alimentación insuficiente, bobina defectuosa, contactos internos dañados	245
			rodamientos	fatiga de elementos rodantes	7	6	7	Contaminación por suciedad o humedad, Carga excesiva o mal distribuida, instalación incorrecta o falta de mantenimiento	294
			sellos mecánicos o Empaquetaduras	Fugas de fluido en el sello	8	6	7	Mal alineamiento del eje, vibraciones excesivas, presión inadecuada en el sistema	336
			anillos de desgaste	Desgaste excesivo	7	4	8	Contacto continuo con el impulsor, partículas abrasivas en el fluido, falta de mantenimiento	224
			contactores	Contactos soldados	6	6	6	Sobrecorriente prolongada, arco eléctrico excesivo, material del contacto inadecuado	216
			interruptores automáticos	No realiza la transferencia automática	7	6	5	Fallo en el módulo de control, bobina de disparo defectuosa, interrupción en el cableado	210
			cable de elevación	Desgaste excesivo de los cables	7	5	6	Fricción constante con poleas, mala lubricación, uso prolongado con cargas pesadas	210
PLC DE SISTEMAS DE CONTROL SCADA	automatizar recibir procesar transmitir y comunicar las señales de los dispositivos de campo	incapaz de automatizar recibir, procesar transmitir y comunicar las señales de los dispositivos de campo	puertos de comunicación	Fallo en la transmisión de datos	7	5	7	Conexiones defectuosas, fallos en el protocolo de comunicación, interferencias electromagnéticas	245
			módulos de entradas y salidas	Fallo en la detección de señales de entrada	8	6	5	Sensores defectuosos, conexiones flojas, fallos en los circuitos de entrada	240
			tarjetas electrónicas	Fallo en la alimentación de la tarjeta	8	7	4	Desconexión de cables, fusibles quemados, fallos en la fuente de alimentación	224
PLANTA DE EMERGENCIA	SUMINISTRAR ENERGIA DE RESPALDO A 1.53 KVA Y 480 V	INCAPACIDAD DE SUMINISTRAR LA ENERGIA ELECTRICA DE RESPALDO EN LOS PARAMETROS REQUERIDOS	Motor Diesel	falla en el motor de arranque	8	6	6	no arranca cuando hay falla en la red general	288
			sistema de combustible	Inyección deficiente	7	6	6	presencia de aire en el sistema de combustible	252
			Sistema de lubricación	baja presión de aceite	7	7	5	oxidación y degradación del aceite	245
			Sistema de Enfriamiento	perdida del refrigerante	7	6	5	cavitación en la bomba de agua	210
			Sistema de Escape	Fugas en el sistema de escape	7	6	6	Acumulación de hollín y carbonización	252
			Alternador	pérdida total de carga	8	6	5	calentamiento Excesivo	240
			Sistema de Control	falla en respuesta de comandos manuales y automáticos	7	6	5	corrosión en los terminales y conectores	210
Sistema de arranque	descarga total o parcial de la batería	8	7	6	sulfatación de las placas	336			

Tabla 15*Ejemplo de Equipos con Criticidad Media*

NIVEL 2	MODO DE FALLA		SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	MECANISMO DE FALLA	NPR
REDUCTOR	engranaje	fractura o rotura de dientes	7	3	6	Contaminación por partículas o agua en el aceite	126
	transformadores de corriente	Saturación del núcleo	6	5	5	Exceso de corriente primaria, diseño inadecuado, material del núcleo defectuoso	150
ARRANCADOR DE CELDA	CTS	devanados en corto	7	4	4	falla en el aislamiento	112
ARRANCADOR SUAVE	CONTROLADOR ELECTRONICO	Falla en la activación del motor	5	3	9	Falla en los contactos de salida, problemas en el software de control, desconexión de alimentación	135
		Falla en la conducción (no dispara)	6	4	8	Disparo insuficiente, fallo en la compuerta de control, circuito de activación dañado	192
	fuelle de alimentación	Falla en la salida de voltaje	6	6	5	Componentes internos dañados, fusible abierto, pérdida de alimentación de entrada	180
MOTORES DE COMBUSTIÓN	turbocompresor	Desgaste excesivo en los cojinetes	7	4	6	Lubricación insuficiente, contaminación del aceite, altas revoluciones continuas	168
	bomba de agua	Fugas de refrigerante	7	5	4	Sellos desgastados, grietas en la carcasa, juntas defectuosas	140

BOMBAS THOMPSON	motor Diesel	humedad en el bobinado	6	5	5	falla en los sellos o retenedores	150
	impulsor	Desgaste excesivo	6	5	5	Fluido con partículas abrasivas, funcionamiento prolongado sin mantenimiento	150
	válvula de retención	Pérdida de aislamiento del cable	5	4	6	Humedad en el sistema, envejecimiento del aislamiento, daños mecánicos	120
TRANSMISOR DE NIVEL	puerto de comunicación	Falla en la transmisión de datos	5	6	4	Configuración incorrecta del protocolo, fallas en el software, cableado defectuoso	120
BOMBA DE ROCIADO	impulsor	Desgaste excesivo	5	5	6	Fluido con partículas abrasivas, funcionamiento prolongado sin mantenimiento	150
	eje	deformación del eje	6	4	5	Sobrecarga torsional o flexión excesiva Falla de los acoplamientos, provocando esfuerzos desiguales, Fatiga estructural por vibraciones	120
	rodamientos	fatiga de elementos rodantes	6	6	5	Contaminación por suciedad o humedad, Carga excesiva o mal distribuida, instalación incorrecta o falta de	180

Tabla 16 Equipos con criticidad baja

NIVEL 2	MODO DE FALLA		SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	MECANISMO DE FALLA	NPR
MOTOR ELECTRICO	Estator	sobrecalentamiento	6	4	3	sobrecarga, baja ventilación, condiciones ambientales	72
	Rotor	desequilibrio del rotor	5	3	2	Desbalance suministro eléctrico, mal montaje	30
	rodamiento	desgaste de rodamientos	6	6	1	lubricación inadecuada, contaminación en el aceite	36
	caja de conexiones	conexión floja	3	2	6	terminales flojas, vibraciones, conexiones mal apretadas	36
	ventilador	rotura de aspas	5	2	2	impacto mecánico, fatiga de material	20
REDUCTOR	eje	deformación del eje	7	2	5	Sobrecarga torsional o flexión excesiva. Falla de los acoplamientos, provocando esfuerzos desiguales. Fatiga estructural por vibraciones prolongadas	70
	Rodamientos	fatiga de elementos rodantes	6	4	2	Contaminación por suciedad o humedad, Carga excesiva o mal distribuida, instalación incorrecta o falta de mantenimiento	48
	sellos y juntas	fuga de lubricante	5	5	1	Desgaste de los sellos, presión excesiva en el sistema, instalación incorrecta, material inadecuado, Ingreso de polvo o agua, fallas en los filtros de ventilación, degradación del lubricante, falta de mantenimiento	25
	carcasa	fisuras o fracturas	4	3	2	Fatiga del material, impactos mecánicos, sobrecarga estructural, defectos de fabricación	24

7 Tareas y acciones correctivas para los equipos críticos

Después de haber sido evaluada la criticidad y haber analizado los hallazgos de los equipos se atacan las fallas más críticas revisando los modos de falla y su criticidad

8 Definimos las estrategias de mantenimiento

Mantenimiento: es un conjunto de tareas que permite el diagnóstico y la intervención de sistemas equipos componentes ítems mantenibles cuyo fin es restaurar el equipo a las condiciones para poder desarrollar su función principal

Mantenimiento Preventivo: es un tipo de mantenimiento planificado que se realiza de manera periódica con actividades periódicas para reducir la probabilidad de fallas y garantizar la disponibilidad de los equipos. Se basa en inspecciones, ajustes, limpieza, lubricación y sustitución de componentes partes ítems mantenibles antes de que ocurra una avería.

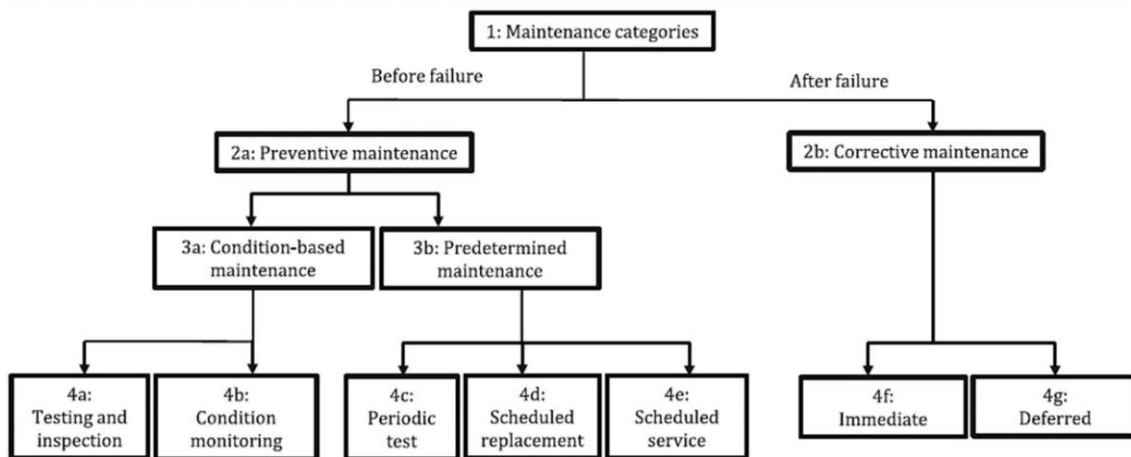
Mantenimiento Correctivo: son las actividades de mantenimiento que se realizan para restaurar un equipo o activo cuando pierde su función principal para lo cual fue diseñado el objetivo es restaurar el equipo o componente a su estado operativo.

Mantenimiento Predictivo. Es monitorear y analizar datos en tiempo real para prevenir las fallas antes que se vuelvan fallas potenciales se utilizan las técnicas de vibraciones, termografía y ultrasonidos para identificar signos de deterioro en los equipos

Mantenimiento TPM: es un modelo de gestión para identificar y eliminar pérdidas de los procesos productivos y administrativos desarrollar habilidades y competencias en el personal para mejorar sus competencias profesor Mauricio Aguilar TPM especialización en gerencia de mantenimiento UIS

Mantenimiento en uso: es el mantenimiento básico realizado en un equipo por el operador de la maquina o el equipo consiste en una serie de actividades básicas limpieza inspección lubricación y ajustes este mantenimiento es la base del TPM “fuente organización y gestión integral del Mantenimiento (Garrido, 2003).

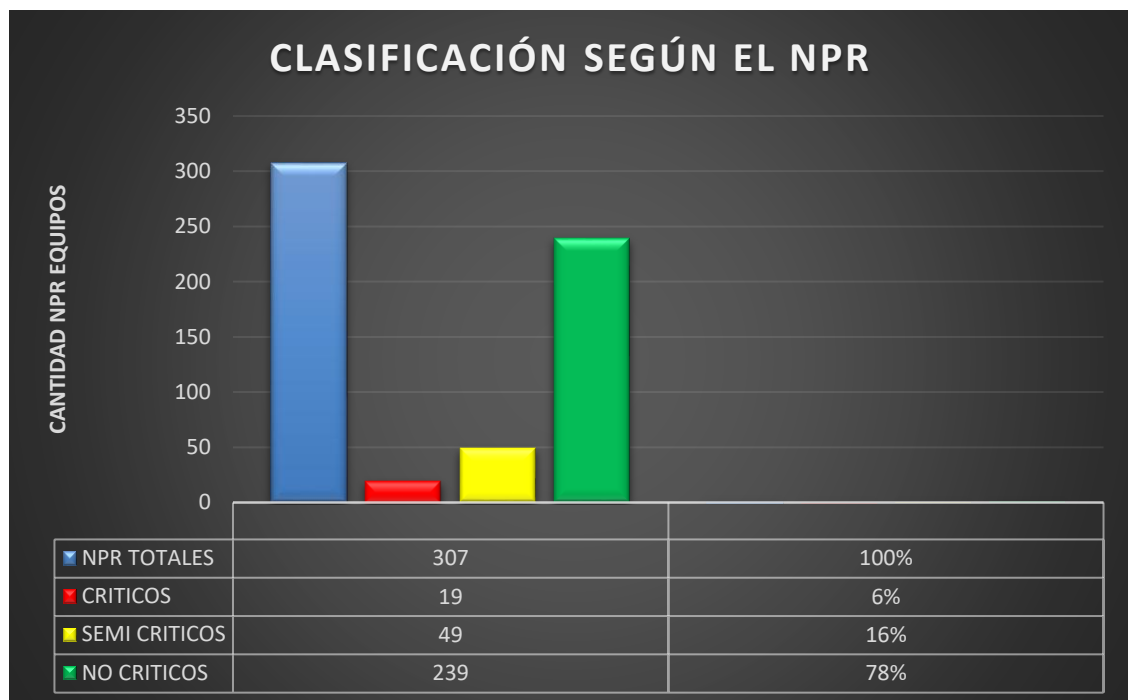
Figura 12 Categorías de mantenimiento



Fuente: ISO 14224 (2016).

Dentro de la implementación del FMECA se encontraron registro de reporte tanto de tareas de mantenimiento como causas de falla de los componentes de manera básica que no aportan una calidad de información, donde se refleja el impacto de confiabilidad del equipo (Gutiérrez, 2009, p. 343), ejemplo: si las tareas de mantenimiento no atacan una causa raíz las fallas van a seguir repitiéndose y esto genera una falsa sensación de control del equipo, pero en realidad la condición del equipo no mejora, también se verán afectados los indicadores donde se observa una distorsión afectando la frecuencia real de fallas, el MTBF y los costos relacionados al mantenimiento reactivo, planes de mantenimientos poco efectivos y problemas en la gestión de conocimiento donde la falta de registro correcto impiden al aprendizaje técnico.

En este análisis se evaluaron 307 componentes pertenecientes a todos los sistemas de la Planta Gibraltar. Como resultado, se identificaron 19 componentes críticos, 49 semi críticos y 239 no críticos. Esta clasificación permitió establecer un enfoque estratégico de mantenimiento con base en la criticidad y comportamiento de los equipos.



Recomendaciones para componentes críticos:

- **Reforzar los planes de mantenimiento preventivo**, aumentando tanto la frecuencia como el número de tareas asociadas a cada componente.
- **Incluir actividades específicas por componente**, adaptadas a los modos de falla detectados en el análisis.
- **Implementar técnicas de mantenimiento predictivo y monitoreo en línea** para la detección temprana de fallas, priorizando métodos no invasivos como análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido y verificación de alineación.
- **Actualizar y alimentar correctamente el perfil o catálogo de cada componente**, para permitir una trazabilidad clara de las causas de falla.
- **Ajustar los tipos de mantenimiento** si se identifican fallas recurrentes, combinando

estrategias preventivas, predictivas y correctivas para mejorar la efectividad.

- **Evaluar continuamente las tareas críticas**, enfocándose en la reducción del riesgo y la confiabilidad operativa.

2. Recomendaciones para componentes semi críticos:

- **Ajustar las frecuencias de mantenimiento** en función del comportamiento de las fallas, y priorizar inspecciones visuales sobre tareas complejas que demandan mayor tiempo y recursos.
- **Incrementar la frecuencia de inspecciones simples**, eliminando actividades costosas que no aportan valor.
- **Implementar rondas de inspección periódicas** en lugar de rutinas que no agregan beneficios al proceso.
- **Aplicar mantenimiento basado en condición**, ejecutando tareas sólo cuando un parámetro operativo indique una desviación o alarma.
- **Focalizar las tareas de mantenimiento** en los modos de falla más relevantes, evitando inspecciones generales que no se justifiquen.
- Si, a pesar de estas acciones, el componente presenta fallas recurrentes, **eleva su nivel de criticidad** y reforzar las tareas dirigidas a las fallas más críticas, previniendo que estos equipos semi críticos sobrecarguen la gestión de mantenimiento.

3. Recomendaciones para componentes no críticos:

- **Reducir o eliminar tareas que no agregan valor**, especialmente si no existen registros de fallas recurrentes.
- **Eliminar el mantenimiento preventivo** en componentes que no lo requieren, según su historial operativo.
- **Agrupar equipos y componentes similares** para realizar inspecciones conjuntas, optimizando recursos.
- **Revisar periódicamente el estado funcional** de los equipos no críticos, ya que cambios en su función o contexto operacional pueden modificar su nivel de criticidad.

- **Reevaluar la criticidad de los componentes anualmente**, o cuando ocurran cambios relevantes en la operación o en las condiciones de servicio.

Algunos indicadores de gestión para tener en cuenta para la implantación de en la planta en los próximos años:

Tabla 17*Indicadores de confiabilidad*

INDICADOR	FORMULA	EVALÚA
MTBF	Horas Operativas /Número De Fallas	Se evalúa la confiabilidad del equipo
MTTR	Tiempo total de reparación/ Número de intervenciones	Eficiencia del mantenimiento correctivo
DISPONIBILIDAD	$MTBF/(MTBF+MTTR)$	Tiempo disponible del equipo
	Tiempo medio entre fallas	TMTBF
	Tiempo medio de reparación	MTTR

Tabla 18*Indicadores mantenimiento preventivo*

INDICADOR	FORMULA	EVALUA
% de cumplimiento del plan de mantenimiento preventivo	$(\text{ordenes PM realizadas/programadas}) * 100$	evalúa la disciplina del quipo en ejecutar mantenimientos
Relación PV/MC	Horas costos de PV/Horas o costos de MC	esfuerzo que se dedica a prevenir en lugar de corregir
	Mantenimiento Preventivo	MP
	Mantenimiento correctivo	MC

Tabla 19*Indicadores de gestión de fallas*

INDICADOR	FORMULA	EVALUA
Frecuencia de Fallas por Equipo Crítico	# de fallas/ periodo de falla (mes o año)	se identifican activos que generan más problemas
Reincidencia de fallas	fallas repetidas/ total de fallas	mide la efectividad de las acciones correctivas

Tabla 20*Indicadores de costo*

INDICADOR	FORMULA	EVALUA
Costo de mantenimiento por equipo	Costo total/# de equipos	Control de presupuesto por activo
% de costos no planificados	(costos correctivos/ total costos) + 100	Control de emergencias y mantenimientos inesperados

Tabla 21*Indicadores de mejora continua*

INDICADOR	FORMULA	EVALUA
Reducción del NPR promedio	(NPR antes- NPR después/ NPR antes) *100	Impacto de las acciones del AMEF
% de modos de falla controlados	(# de modos de falla con acciones completadas / Total críticos) *100	seguimiento del plan de acción

El plan de proyecto sugerido requería el uso del indicador de confiabilidad FMECA (Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad) para identificar, agrupar y clasificar los

modos de fallo de los equipos de la planta de ascensores de Gibraltar, con esta señal de gestión, pudimos analizar las herramientas más importantes de la planta en función de sus factores de intensidad, incidencia y detectabilidad. Según su NPR (Número de Prioridad de Riesgo), estas se agruparon.

A través de la implementación del FMECA se lograron identificar componentes con un NPR mayor a 200 lo cual se evidencia su impacto sobre la confiabilidad operativa, la disponibilidad del servicio y a los riesgos asociados a la seguridad y medio ambiente.

Con este análisis se pudo establecer un orden de prioridad para intervenir los equipos críticos, se identificaron modos, mecanismos de falla que pueden codificarse y estructurarse según la norma ISO 14224 de 2016, con esto podemos facilitar una mejor integración con los sistemas de gestión (CMMS), mejorando la trazabilidad de eventos, tras la aplicación del FMECA y clasificación del riesgo mediante el NPR implementando una estrategia de ingeniería de confiabilidad se sentaron las bases para aplicar un RCM(mantenimiento centrado en confiabilidad y también se inicia una clasificación estructurada de fallos que permitirá aplicar análisis más profundos como RCA (Análisis de causa Raíz) y optimizar recursos, y finalmente al actualizar el plan de mantenimiento para optimizar la vida útil de los equipos, se cuenta con información detallada para ajustar frecuencias, rutinas e inspecciones preventivas, este estudio permitirá validar las actualizaciones propuestas con el grupo de operación y mantenimiento garantizando su aplicación práctica, por último se puede establecer un plan piloto de mantenimiento, replicarse en otras plantas de EABB, como una estrategia de estandarización.

A continuación, se muestra cómo eran reportadas las fallas y se realiza un ejemplo de cómo deberían reportarse para tener una mayor calidad de información.

Tabla 22 Reporte de causa de fallas y tareas de mantenimiento

Descripción	Denominación	Denominación	GrpMotivosTxt.	Txt. cód. mot.	Texto causa
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 1			undefined/undefined
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 2			undefined/undefined
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 3			undefined/undefined
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 4			undefined/undefined
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 4	CAUSAS-MECANISMO DE FALLA	Otro	.
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 1			undefined/undefined
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 2			undefined/undefined
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 2	CAUSAS-MECANISMO DE FALLA	No se encontró ninguna causa	.
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 3			undefined/undefined
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 3	CAUSAS-MECANISMO DE FALLA	No se encontró ninguna causa	.
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 4			undefined/undefined
PV INSPEC GENERAL ACTUADORES 3M	CANAL AGUAS LLUVIAS GIBRALTAR	ACTUADOR 4	CAUSAS-MECANISMO DE FALLA	No se encontró ninguna causa	.

Podemos observar que no se reporta una causa de falla y las tareas de mantenimiento no son específicas a continuación se refleja un cuadro más específico de cómo deberían reportarse estas tareas de mantenimiento:

Tabla 23 Tareas de mantenimiento actuales y actualizadas

TAREAS DE MANTENIMIENTO ACTUALES		TAREAS DE MANTENIMIENTO ACTUALIZADAS		
EQUIPO	TAREA DE MANTENIMIENTO	EQUIPO	TAREAS DE MANTENIMIENTO	RECURSO HUMANO
			Limpieza del polvo y Residuos	26360EL1
	PD ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA 3M		Mantenimiento del sistema de ventilación	26360 ET1
			control de humedad	26360 ET1
			actualización de software	26360 ET1
ARRANCADOR SUAVE		ARRANCADOR SUAVE	inspección de componentes internos	26360 ET1
	PV AJUSTE DE CONEXIONES ARRANCADORES 3M		Realizar pruebas de funcionamiento mecánico, incluyendo apertura, cierre y rearme del interruptor automático, para garantizar su correcta operación	26360 EL1
			Inspección visual y limpieza y ajuste de conexiones	26360 EL1
TRANSFERENCIA AUTOMÁTICA	PV AJUSTE CONEXIONES TABLERO TRANS 3M	PV AJUSTE CONEXIONES TABLERO TRANS 3M	Realice pruebas de funcionamiento mecánico, incluyendo apertura, cierre y rearme del interruptor automático, para garantizar su correcta operación	26360 EL1

			pruebas funcionales	26360EL1
			verificar conexiones y componentes	26360EL1
			ajuste de la unidad Hidráulica	26360 MM1
			revisar cableado, mensualmente	26360EL1
			realizar proceso de limpieza	26360MM1
			revisar tubería y mangueras hidráulicas	26360MM1
			bajada y subida del gancho pescante y accionamiento del carro	26360MM1
LIMPIA REJILLAS HIDRAULICO		LIMPIA REJILLAS HIDRAULICO	unidades de desplazamiento ruedas rodillos laterales	26360MM1
			ajustar la cadena del rodillo	26360MM1
			función y ajuste de los dos motores de freno	26360EL1
			verificar niveles de aceite	26360MM1
			funcionalidad y ajuste de los interruptores de limite	26360MM1
			ajuste de la válvula de presión	26360MM1
			inspección visual	26360 ET1
			verificar signos de sobrecalentamiento (termografía)	26360EL1
FUENTE-MODULO SUPLENCIA ELTEK		FUENTE-MODULO SUPLENCIA ELTEK	verificar entrega de tensión de salida en el inversor	263760ET1
			verificar signos de alarma del sistema	26370ET1
			simulación de fallas de energía y verificar la respuesta del inversor y la carga de las baterías	26360ET1
	PV MTTO GRAL ELECTRICO-LIMPIE - AJUSTE 3M			
	PV LUBRICACIÓN LIMPIA REJILLAS 1Y			
	PV AJUSTE CONEXION SIST ENERGIA ELTEK 6M			

			realizar pruebas de carga y descarga de las baterías	26370ET1
			eliminar polvo y suciedad con aire comprimido	26370ET1
			medición de las variables eléctricas tensión y corriente	26370ET1
		PD ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA 6M	medir la capacidad de carga y el voltaje individual de cada celda	26370ET1
			predictivo revisar registros históricos del sistema	26370ET1
			verificar los tiempos de conmutación entre la fuente principal y el respaldo	26370ET1
			inspección de los conectores cables de alimentación y comunicación	26370ET1
			limpieza y ajustes de conexiones	26370ET1
			revisión de los módulos de expansión	26370ET1
			pruebas de respaldo y recuperación del programa	26370ET1
			revisión de la ventilación y polvo en los componentes	26370ET1
			medición de la tensión de alimentación	26360EL1
			revisión del software y datos del SCADA	26360EL1
			chequeo de alarmas y eventos en el Plc y SCADA	26360EL1
PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA	PV VERIFICACIÓN PUERTO ETHERNET PLC 3M	PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA		

			realizar pruebas de aislamiento entre fases	26370EL1
			realizar mediciones de corriente y comparar con la lectura del display del arrancador suave	26370EL1
BOMBA ELECTROSUMERGIBLE	PV MEDICION AISLAMIENTO BOMBAS ELECT 3M	BOMBA ELECTROSUMERGIBLE	limpieza de filtros tubería y componentes internos	26370MM1
			realizar pruebas de funcionalidad	26360EL1
			análisis de termografía de los componentes eléctricos	26360EL1
			verificar estado de los accesorios instalados en la succión y descarga de la bomba	26370MM1
			lavado general del equipo con limpiadores anti grasa	26370MM1
			Revisión de niveles de lubricante, refrigerante, combustible, nivel de electrolito en baterías.	26370 MM1
			Verificación del funcionamiento del Pre calentador	26370 MM1
			Limpeza y verificación de funcionamiento del sistema de refrigeración, nivel de agua, radiador, mangueras, abrazaderas, bombas de agua	26370MM1
GENERADOR DE EMERGENCIA	MANTENIMIENTO GENERAL	GENERADOR DE EMERGENCIA	Limpeza, revisión del sistema de combustible (tubería bomba de inyección, inyectores)	26370 MM1
			Revisión, limpieza, reajuste de conexiones de instrumentos y del interruptor principal.	26370EL1
			Limpeza y verificación del grupo de baterías, acidez del agua, estado de carga	26370EL1
			Termografía a conexiones eléctricas y partes mecánicas (Alternador, generador)	26360EL1
			Inspeccionar contactores y breakers motorizados	26370EL1
	PV REVISIÓN PLANTA		Inspeccionar sistema de control	26370EL1

ELÉCTRICA IM	Medir Voltaje y corrientes entre Fases, Tierra y Neutro, Sistema red y planta	26370EL1
	Limpieza elementos de control y potencia	26370EL1
	Ajuste tornillería de entrada y salida a contactores y/o motorizados y sistemas de control	26370 EL1
	Realizar pruebas de funcionalidad en vacío y con carga en manual y automático	26370EL1
	Termografía a los sistemas eléctricos	26360EL1
26360/70EL1	TECNICO ELECTRICISTA NIVEL 1	
26360/ET1	TECNICO ELECTRONICO NIVEL 1	
26370/MM1	TECNICO MECANICO NIVEL 1	

Se puede observar que se abarcan un mayor número de tareas de mantenimiento y se puede garantizar un mejor funcionamiento, disponibilidad del equipo y una clara información al técnico de que se debe realizar cuando se intervenga al equipo y no dejar la tarea de mantenimiento a la consideración del técnico. así se puede enviar un reporte más concreto de lo que se realizó en el equipo.

Conclusiones

1. El plan de mantenimiento actual no ha sido actualizado desde el principio, lo que disminuye la eficiencia operativa de la planta, y el aumento de los modos de falla, se presentan mayores costos en la operación y el mantenimiento, ya que no hay una trazabilidad en la ejecución de las tareas y las actividades recomendadas de mantenimiento para los equipos y componentes.
2. Se utilizó el análisis NPR, este análisis nos ayuda a poder priorizar el riesgo con el fin de actualizar los planes de mantenimiento actuales del 100% de los componentes analizados en la plantilla FMECA el 25% de los componentes no tienen un plan de mantenimiento actualizado hacen falta la asignación de tareas definir frecuencias y estrategias para la optimización y disponibilidad de los equipos instalados.
3. Al identificar nuevas causas de falla mediante este análisis, se establece un enfoque para priorizar un plan de mantenimiento estratégico. Este plan incluye ajustes en las frecuencias de mantenimiento, basados tanto en los históricos de mantenimiento como en las recomendaciones del fabricante, asegurando así un desempeño óptimo de los equipos y componentes.
4. Con el análisis bajo la metodología del FMECA permitió aplicar conceptos fundamentales de ingeniería de confiabilidad, se establecieron clasificaciones por severidad, ocurrencia y detectabilidad, lo cual constituye un plazo clave hacia la implementación de estrategias más compactas como el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) y análisis de causa raíz (RCA).
5. Con el análisis se definieron acciones específicas orientadas a la prevención y detección temprana de fallas en los equipos críticos. Estas acciones permitirán actualizar el plan de mantenimiento actual, mejorar la vida útil de los activos y facilitar su validación e implementación conjunta con el grupo de operación y mantenimiento, garantizando así su aplicabilidad y efectividad en la planta.
6. Con este proyecto se logró proponer una nueva clasificación y codificación de los modos de falla, basada en la norma técnica ISO 14224, organizada por familias de componentes. Es fundamental actualizar periódicamente el análisis de los equipos y componentes, ya que pueden presentarse renovaciones, así como cambios en su función y en el contexto operacional que influyen directamente en su comportamiento y criticidad.

Recomendaciones

Se recomienda estandarizar la codificación de fallas y tareas de mantenimiento en el sistema de gestión SAP-PM de la empresa, adoptar la estructura de la ISO 14224 para, códigos de causa raíz, modos de falla y categorías de intervención esto mejorara la calidad de los datos capturados por los técnicos y hará que los reportes sean más útiles para la toma de decisiones.

Rediseñar los formatos de notificaciones y cierre de órdenes, donde se puedan ajustar los campos obligatorios en las ordenes de trabajo para incluir información clave (equipo, tipo de fallo, tiempo de parada, causa y acción tomada), evitar reportes genéricos o incompletos, capacitar al personal en cómo llenar las OT de forma correcta clara y coherente.

Fortalecer la cultura de confiabilidad en toda la organización en un periodo de 2 años, realizar capacitaciones periódicas sobre, AMEF/FMECA, RCA, ISO 14224, establecer un grupo interno de confiabilidad, que lideren las mejoras, análisis y seguimiento de KPIs e integrar a los operadores en la identificación de modos de falla y mejora continua.

Integrar todas las áreas correlacionadas con el mantenimiento en la EABB para organizar las mesas técnicas de trabajo y definir el perfil catálogo de las fallas y poder alimentar el sistema de gestión SAP-PM y clasificar las fallas más recurrentes el propósito del perfil catalogo es mejorar la gestión del mantenimiento optimizando los tiempos de respuesta de las averías

Empezar a integrar gestionar y documentar los indicadores de Mantenimiento para la mejora continua de la toma de decisiones optimización de costos aumentar la disponibilidad de los equipos facilitar la planificación programación y ejecución del mantenimiento, tener la certeza que los equipos estén operando dentro de los estándares de seguridad, Indicadores que deben estar en el mantenimiento de la organización MTTR, MTBF.

Se recomienda actualizar los planes de mantenimiento para atacar las tareas más críticas para evitar fallas y reducir las paradas no planificadas esto nos permite una mayor planificación de los recursos y los repuestos

Referencias

- Garrido, S. G. (2003). Manual del ingeniero: Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (Capítulo 3). Ediciones Díaz de Santos.
- Gutiérrez, A. M. (2009). La función principal del FMECA es organizar las tareas correctivas, modificativas o proactivas de mantenimiento que se deben realizar después de haber ejecutado exhaustivamente el análisis de fallas. *Mantenimiento: Planeación* (p. 343). Alfaomega Grupo Editor.
- José R. Aguilar-Otero, Rocío Torres-Arcique, & Diana Magaña-Jiménez. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Revista de Ingeniería*, 10(1), 15–26.
- Knezevic, J. (2014). *Mantenibilidad* (I. de S. Isdefe, Ed.). Isdefe.
- Nachlas, J. A. (2023). *Probability foundations for engineers* (2a ed.). CRC Press.
- Parra, C. (2005). Implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) en un sistema de producción. Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros.
- De la Vega Genebelín Valbuena Chourio, M. Y. H. G. (2004). *Ingeniería de confiabilidad y análisis probabilístico de riesgo*. Reliability and Risk Management, S. A.

Anexos

Anexo 1 Clasificación NPR críticos

NIVEL 2	FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	MECANISMO DE FALLA	NPR	
TRANSFERENCIA AUTOMATICA	cambiar automáticamente la fuente de alimentación del sistema eléctrico entre la red principal y el generador de emergencia en caso de una falla o interrupción del suministro de 460 vac	incapaz de hacer el cambio automático entre la fuente de alimentación de la red principal y el generador de emergencia cuando se presente una falla en la red de 460 vac	bypass interno	Falla en la activación del bypass	7	4	8	Problema en la señal de activación, contactos sucios o desgastados, falla en el controlador	224
			cable sumergible y conector hermético	No activa la bomba	7	5	7	Alimentación insuficiente, bobina defectuosa, contactos internos dañados	245
			rodamientos	fatiga de elementos rodantes	7	6	7	Contaminación por suciedad o humedad, Carga excesiva o mal distribuida, instalación incorrecta o falta de mantenimiento	294
			sellos mecánicos o Empaquetaduras	Fugas de fluido en el sello	8	6	7	Mal alineamiento del eje, vibraciones excesivas, presión inadecuada en el sistema	336
			anillos de desgaste	Desgaste excesivo	7	4	8	Contacto continuo con el impulsor, partículas abrasivas en el fluido, falta de mantenimiento	224
			contactores	Contactos soldados	6	6	6	Sobrecorriente prolongada, arco eléctrico excesivo, material del contacto inadecuado	216
			interruptores automáticos	No realiza la transferencia automática	7	6	5	Fallo en el módulo de control, bobina de disparo defectuosa, interrupción en el cableado	210
			cable de elevación	Desgaste excesivo de los cables	7	5	6	Fricción constante con poleas, mala lubricación, uso prolongado con cargas pesadas	210
PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA	Automatizar, recibir procesar, transmitir y comunicar las señales de los dispositivos de campo	incapaz de automatizar, recibir procesar, transmitir y comunicar las señales de los dispositivos de campo	puertos de comunicación	Fallo en la transmisión de datos	7	5	7	Conexiones defectuosas, fallos en el protocolo de comunicación, interferencias electromagnéticas	245
			módulos de entradas y salidas	Fallo en la detección de señales de entrada	8	6	5	Sensores defectuosos, conexiones flojas, fallas en los circuitos de entrada	240
			tarjetas electrónicas	Fallo en la alimentación de la tarjeta	8	7	4	Desconexión de cables, fusibles quemados, fallos en la fuente de alimentación	224
PLANTA DE EMERGENCIA	SUMINISTRAR ENERGIA DE RESPALDO A 1.53 KVA Y 480 V	INCAPACIDAD DE SUMINISTRAR LA ENERGIA ELECTRICA DE RESPALDO EN LOS PARAMETROS REQUERIDOS	Motor Diesel	falla en el motor de arranque	8	6	6	no arranca cuando hay falla en la red general	288
			sistema de combustible	Inyección deficiente	7	6	6	presencia de aire en el sistema de combustible	252
			Sistema de lubricación	baja presión de aceite	7	7	5	oxidación y degradación del aceite	245
			Sistema de Enfriamiento	perdida del refrigerante	7	6	5	cavitación en la bomba de agua	210
			Sistema de Escape	Fugas en el sistema de escape	7	6	6	Acumulación de hollín y carbonización	252
			Alternador	Pérdida total de carga	8	6	5	calentamiento Excesivo	240
			Sistema de Control	falla en respuesta de comandos manuales y automáticos	7	6	5	corrosión en los terminales y conectores	210
			Sistema de arranque	descarga total o parcial de la batería	8	7	6	sulfatación de las placas	336

Anexo 2 Clasificación NPR semicríticos

NIVEL 2	MODO DE FALLA		SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	MECANISMO DE FALLA	NPR
REDUCTOR	Engranaje	fractura o rotura de dientes	7	3	6	Contaminación por partículas o agua en el aceite	126
	transformadores de corriente	Saturación del núcleo	6	5	5	Exceso de corriente primaria, diseño inadecuado, material del núcleo defectuoso	150
ARRANCADOR DE CELDA	CTS	devanados en corto	7	4	4	falla en el aislamiento	112
ARRANCADOR SUAVE	CONTROLADOR ELECTRONICO	Falla en la activación del motor	5	3	9	Falla en los contactos de salida, problemas en el software de control, desconexión de alimentación	135
		Falla en la conducción (no dispara)	6	4	8	Disparo insuficiente, fallo en la compuerta de control, circuito de activación dañado	192
		fuelle de alimentación	Falla en la salida de voltaje	6	6	5	Componentes internos dañados, fusible abierto, pérdida de alimentación de entrada
MOTORES DE COMBUSTIÓN	turbocompresor	Desgaste excesivo en los cojinetes	7	4	6	Lubricación insuficiente, contaminación del aceite, altas revoluciones continuas	168
	bomba de agua	Fugas de refrigerante	7	5	4	Sellos desgastados, grietas en la carcasa, juntas defectuosas	140

BOMBAS THOMPSON	motor Diesel	humedad en el bobinado	6	5	5	falla en los sellos o retenedores	150
	impulsor	Desgaste excesivo	6	5	5	Fluido con partículas abrasivas, funcionamiento prolongado sin mantenimiento	150
	válvula de retención	Pérdida de aislamiento del cable	5	4	6	Humedad en el sistema, envejecimiento del aislamiento, daños mecánicos	120
TRANSMISOR DE NIVEL	puerto de comunicación	Falla en la transmisión de datos	5	6	4	Configuración incorrecta del protocolo, fallas en el software, cableado defectuoso	120
BOMBA DE ROCIADO	impulsor	Desgaste excesivo	5	5	6	Fluido con partículas abrasivas, funcionamiento prolongado sin mantenimiento	150
	eje	deformación del eje	6	4	5	Sobrecarga torsional o flexión excesiva Falla de los acoplamientos, provocando esfuerzos desiguales, Fatiga estructural por vibraciones prolongadas	120
	rodamientos	fatiga de elementos rodantes	6	6	5	Contaminación por suciedad o humedad, Carga excesiva o mal distribuida, instalación incorrecta o falta de mantenimiento	180
TABLERO DE CONTROL DE BOMBA DE ROCIADO	contactor	Contactos soldados	5	5	6	Sobrecorriente prolongada, arco eléctrico excesivo, material del contacto inadecuado	150
	fusibles	Fusible fundido prematuramente	6	3	6	Sobrecorriente momentánea, fusible mal dimensionado, defecto de fabricación	108

	relé térmico	Disparo intempestivo	5	6	4	Ajuste incorrecto de la corriente nominal, temperatura ambiente elevada, vibraciones	120
MEDIDOR MULTIFUNCIONAL CELDA	DISPLAY	No muestra información	4	6	6	Fallo en la conexión eléctrica, daño en el cableado, módulo de control defectuoso	144
ARRANCADOR BOMBA CONTINGENCIA	interruptor	No activa o no abre el circuito	5	4	6	Bobina defectuosa, falta de alimentación, contactos quemados o sucios	120
	fusibles	Fusible fundido prematuramente	5	6	6	Sobrecorriente momentánea, fusible mal dimensionado, defecto de fabricación	180
TRANSFORMADOR DE AISLAMIENTO	Devanados	Cortocircuito en el devanado	6	4	5	Picos de tensión, envejecimiento del aislamiento, sobrecarga eléctrica	120
BANCO DE CONDENSADORES	contactores	No activa o desactiva el banco de condensadores	5	6	6	Falla en la bobina, contactos internos dañados, cableado defectuoso	180
	sensores de voltaje y frecuencia	No detecta cambios de voltaje o frecuencia	6	5	5	Sensor dañado, cableado defectuoso, fallo en el circuito de medición	150
TRANSFERENCIA AUTOMÁTICA	módulo de control	No envía la señal de transferencia	5	5	5	Falla en el software, daño en la placa de control, interrupción del cableado	180
	interfaz	No muestra información en pantalla	5	5	6	Conexión defectuosa, fallo en el módulo de control, pantalla dañada	150
	protecciones	No activa la protección en caso de falla	6	4	5	Falla en el sensor, módulo de control dañado, cableado desconectado	120
TABLERO DISTRIBUCIÓN CELDA	interruptores automáticos	No realiza la transferencia automática	5	5	5	Fallo en el módulo de control, bobina de disparo defectuosa, interrupción en el cableado	125

	aceite dieléctrico	Pérdida de propiedades dieléctricas	6	5	4	Envejecimiento del aceite, degradación térmica, sobrecalentamiento del transformador	120
	tanque o cuba	Fugas de aceite	6	5	5	Deterioro de juntas, grietas, fallas en soldaduras	150
CELDA DE MEDIDA +S1H3	TRANSFORMADORES DE MEDIDA	Fallo en conexiones eléctricas	6	4	5	Descalibración, envejecimiento del núcleo, interferencias electromagnéticas	120
	seccionador de línea	Fallo en la apertura o cierre del seccionador	6	5	5	Mecanismo bloqueado, acumulación de suciedad, desgaste de resortes	150
CELDA DE ENTRADA Y SALIDA	mecanismos de enclavamiento	Fallo en el enclavamiento mecánico	6	5	4	Piezas desalineadas, suciedad acumulada, falta de lubricación	120
INTERRUPTOR CELDA +S1H4	Mecanismos de operación	Fallo en la apertura del interruptor	6	5	5	Mecanismo atascado, resortes debilitados, acumulación de suciedad	150
	sistema hidráulico	Fugas de aceite hidráulico	6	5	4	Desgaste en sellos y empaques, fisuras en mangueras, conexiones flojas	120
PULPÓ ELECTROHIDRAULICO	sistemas de control	Fallo en la respuesta de los controles	5	6	4	Fallas en sensores, conexiones defectuosas, alimentación insuficiente	120
	guayas	Desgaste excesivo de la guaya	6	6	5	Fricción constante, falta de lubricación, contacto con bordes afilados	180
	puente	Fisuras o fracturas en la estructura del puente	7	5	5	Sobrecarga mecánica, impactos repetitivos, fatiga del material	175
PUENTE GRUA INTERNO 1	polipasto	Fallo en el motor del polipasto	6	5	4	Sobreuso, fallas en el bobinado, problemas en la alimentación eléctrica	120
	botonera	Fallo en la respuesta de los botones	5	6	5	Mal funcionamiento interno, suciedad acumulada, fallas en el circuito eléctrico	150