

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTOMATIZACIÓN CON APLICACIONES WEB (WEB APP) DEL  
PROCESO DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD  
(RCM) PARA FACILIDADES HIDROMECAÑICAS**

**AUTOMATIZACIÓN CON WEB APP, DEL PROCESO RCM PARA  
UNA ESTACIÓN DE BOMBEO.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**LENIN ALEXIS PÉREZ VILLACRES**

**lenin.perez01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ALVARO GONZALO XAVIER AGUINAGA BARRAGAN**

**alvaro.aguinaga@epn.edu.ec**

**DMQ, Agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Lenin Alexis Pérez Villacrés declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**Lenin Alexis Pérez Villacrés**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Lenin Alexis Pérez Villacrés, bajo mi supervisión.

---

**Álvaro Gonzalo Xavier Aguinaga Barragán**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Lenin Alexis Pérez Villacrés

Álvaro Gonzalo Xavier Aguinaga Barragán

## DEDICATORIA

Dedico este presente trabajo a mi madre Susana Villacrés, pues sin ella no lo podría haber logrado. Tus bendiciones de cada mañana a lo largo de mi vida me protegen y me encamina hacia la senda de la rectitud. Razón por la cual madre mía este trabajo es el resultado de tu paciencia y amor. Te amo infinitamente.

A mi padre César Pérez, por motivarme a ir siempre en contra del sistema, demostrándole siempre mi capacidad para cumplir mis sueños.

A mi hermana la Ing. Katherine Pérez quien es mi motivación y ejemplo para seguir adelante, también mi amiga fiel que siempre estuvo a mi lado, estoy seguro de que siempre contaré contigo.

A mi gran amigo el Dr. Jaime Villacrés, el cual fue mi compañero a lo largo de todo este proceso de éxito.

A mi primo Ms. Cristhian Pérez, quien fue el primer familiar que tuvo el honor de formar parte de la comunidad politécnica.

Alexis

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias, Dios mío, por infundir en mí la sabiduría y la fortaleza necesarias para llevar a cabo este esfuerzo. Que este trabajo sea un testimonio de tu bondad y de mi compromiso con aprender y crecer.

En este momento importante de mi vida educativa y de crecimiento personal, deseo también expresar mi profundo agradecimiento a mis queridos padres César Pérez y Susana Villacrés, por formar parte importante de este proceso y ayudarme a cumplir mi meta, porque sin su dedicación, cariño y entrega, nada de esto habría podido realizarse.

A mi hermana Katherine Pérez, a quien agradezco por estar siempre junto a mí en los momentos difíciles, siempre te llevare en mi corazón, contigo nunca me sentiré solo, ya que desde pequeño tú me cuidabas. Eres mi alegría y sé que llegarás muy alto.

Alexis

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT .....	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1. Definición de Mantenimiento.....	4
1.4.2. Evolución del mantenimiento.....	4
1.4.3. Tipos de Mantenimiento.....	5
<input type="checkbox"/> Mantenimiento Correctivo .....	5
<input type="checkbox"/> Mantenimiento Preventivo.....	6
<input type="checkbox"/> Mantenimiento Predictivo .....	6
<input type="checkbox"/> Confiabilidad Operacional .....	6
<input type="checkbox"/> Costo Óptimo .....	7
1.4.4. Desgaste y Falla .....	8
1.4.4.1. Procesos de Desgaste y Falla.....	8
<input type="checkbox"/> Fricción .....	8
<input type="checkbox"/> Corrosión .....	8
<input type="checkbox"/> Deformación plástica y rotura.....	9
<input type="checkbox"/> Problemas de Integridad.....	9
<input type="checkbox"/> Fatiga Estructural. ....	10

□ Fatiga Superficial.....	10
□ Fatiga térmica.....	10
□ Explosiones e Incendios.....	11
□ Cavitación .....	11
□ Golpe de Ariete.....	12
□ Problemas Eléctricos.....	12
<b>1.4.5. Causas de Fallos y soluciones.....</b>	<b>12</b>
<b>1.4.5.1. Técnicas o Herramientas.....</b>	<b>13</b>
□ Diagrama de Pareto .....	13
□ Diagrama de Ishikawa .....	13
□ Análisis de Causa Raíz.....	14
□ Método de los ‘5 por qué’ .....	14
<b>1.4.5.2. Solución para causa de fallos.....</b>	<b>15</b>
<b>1.4.6. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).....</b>	<b>15</b>
<b>1.4.6.1. Origen.....</b>	<b>15</b>
<b>1.4.6.2. Definición del RCM.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4.6.3. Normas RCM.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4.6.4. Las siete preguntas básicas del RCM.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4.6.5. Pasos para implementación del RCM .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.6.6. Definición del contexto operacional .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.6.7. Diagrama EPS y definición de ISED’S .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.6.8. Funciones de los ISED’s .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4.6.9. Modo de falla de los ISED’s.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4.6.10. Causas de fallas y solución .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4.6.11. Consecuencias de las fallas.....</b>	<b>19</b>
<b>1.4.6.12. Gravedad, Frecuencia y Detectabilidad.....</b>	<b>19</b>
<b>1.4.6.13. Índice de prioridad de riesgo (IPR).....</b>	<b>20</b>

1.4.6.14. Correctivos AMFE para IPR > 100 .....	20
1.4.6.15. Selección de tareas .....	20
1.4.6.16. Plan de mantenimiento óptimo (PMO) .....	21
2. METODOLOGÍA.....	22
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
3.1. Resultados.....	30
3.2. Conclusiones .....	35
3.3. Recomendaciones .....	36
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Contexto Operacional .....	22
<b>Tabla 2.2.</b> Definición de ISED'S .....	23
<b>Tabla 2.3.</b> Funciones y modos de falla .....	24
<b>Tabla 2.4.</b> Causas directas. ....	24
<b>Tabla 2.5.</b> Tipos de Diagnostico .....	25
<b>Tabla 2.6.</b> Causas de falla por corrosión.....	25
<b>Tabla 2.7.</b> Posibles Soluciones.....	25
<b>Tabla 2.8.</b> Cadena de causas de falla y Soluciones por corrosión.....	26
<b>Tabla 2.9.</b> Severidad del índice de Gravedad (G).....	26
<b>Tabla 2.10.</b> Probabilidad del índice de Frecuencia (F). ....	26
<b>Tabla 2.11.</b> Probabilidad del índice de Detectabilidad (D). ....	27
<b>Tabla 2.12.</b> Cuadro de Análisis Modal de Falla y Efecto AMFE. ....	27
<b>Tabla 2.13.</b> Cuadro de tareas de mantenimiento. ....	28
<b>Tabla 2.14.</b> Cuadro de estrategias de mantenimiento. ....	28
<b>Tabla 2.15.</b> Cuadro de personal de mantenimiento. ....	28
<b>Tabla 2.16.</b> Cuadro de materiales de mantenimiento. ....	29
<b>Tabla 2.17.</b> Plan de Mantenimiento Óptimo .....	29
<b>Tabla 3.1.1.</b> Contexto Operacional de la estación de bombeo AUCA51 de Petroecuador. .....	30
<b>Tabla 3.1.2.</b> Definición de ISED's la estación de bombeo AUCA51 de Petroecuador.....	31
<b>Tabla 3.1.3.</b> Cadena Funciones y modos de falla de los ISED's establecido para la estación de bombeo. ....	32
<b>Tabla 3.1.4.</b> Cadena de causas de fallas y soluciones para los modos de fallas establecidos para la estación de bombeo AUCA51. ....	33
<b>Tabla 3.1.5.</b> Cuadro AMFE para la estación de bombeo AUCA51.....	34
<b>Tabla 3.1.6.</b> Plan óptimo de Mantenimiento para la estación de bombeo AUCA51. ....	35

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.1.</b> Componentes de la confiabilidad .....	7
<b>Ilustración 1.2.</b> Costos vs Confiabilidad .....	7
<b>Ilustración 2.</b> Costos vs Confiabilidad .....	23
<b>Ilustración 3.1.1.</b> Diagrama EPS para la planta de Deshidratación AUCA51. ....	31

## RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular aborda el desarrollo de una web app, aplicación que se utiliza mediante un navegador web, la cual no requiere ser descargada e instalada en un dispositivo. La creación de esta web app es dar una alternativa para mejorar los problemas actuales de empresas pequeñas o pymes, las cuales cuentan con un deficiente proceso de mantenimiento, provocando una baja productividad y falta de competitividad. Para esto se utilizó el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) mediante el uso de las aplicaciones Excel y Google Sheets. Además, se requirió de una base de datos de una planta de deshidratación de crudo de la empresa Petroecuador estación AUCA 51, con lo cual se logró obtener una web app con un proceso de mantenimiento eficiente para el sistema de bombeo del sistema de transferencia de crudo, en menor tiempo y con un bajo costo de mantenimiento.

**PALABRAS CLAVE:** Transferencia de crudo, RCM, Deshidratación de crudo, Sistema de Bombeo, Web app, ISED´S.

## **ABSTRACT**

The present work on curriculum integration addresses the development of a web app, an application that is used through a web browser and does not require downloading and installation on a device. Creating this web app provides an alternative to improve current issues faced by small businesses or SMEs, which have a deficient maintenance process, causing low productivity and lack of competitiveness. For this purpose, the reliability-centered maintenance (RCM) process was employed using Excel and Google Sheets applications. Additionally, a database was required, obtained from the crude dehydration plant of Petroecuador's AUCA 51 station. This enabled the creation of a web app with an efficient maintenance process for the pumping system in the crude transfer system, achieving reduced maintenance time and low cost.

**KEYWORDS:** Crude Transfer, RCM (Reliability Centered Maintenance), Crude Dehydration, Pumping System. pumping system, Web App, ISED'S.

# 1. INTRODUCCIÓN

Las industrias nacionales requieren cada vez más disminuir el tiempo y el costo de mantenimiento, debido a que actualmente lo hacen de una manera empírica y no estructurada, con las graves consecuencias de baja de productividad y falta de competitividad, por lo que no solo basta con aplicar tareas preventivas, sino además emplear un mantenimiento eficiente que no solo tome en cuenta aspectos operacionales sino también medioambientales y de seguridad.

A nivel nacional las industrias requieren aumentar la productividad en la ejecución de materia prima para lo cual es necesario dos factores importantes como disminuir el tiempo y el costo de mantenimiento, en la mayoría de empresas estos procesos se lo realizan de forma empírica y no presentan una adecuada estructura, teniendo como resultado baja productividad y falta de competitividad, por lo cual no es suficiente solo aplicar tareas preventivas, sino se necesita emplear un mantenimiento eficiente que tome en cuenta tanto aspectos operacionales como medioambientales y de seguridad.

Mediante el método RCM el cual busca la eliminación de las averías que se pueden generar dentro de un sistema de bombeo, en el cual se basa en detectar los tipos de fallos presentes, donde se estudia las consecuencias de las fallas, con el único objetivo de tomar decisiones por medio de actividades de mantenimiento para prevenir fallas y que el grado de deterioro no colapse siendo este sistematizado de forma adecuada sin retrasar la producción.

Al tener en cuenta el problema se ha tomado como alternativa la aplicación de la metodología RCM con aplicaciones Web App a sistemas de bombeo de nuestro país, ya que actualmente existen millones de usuarios Android que mueven el mundo a través de una aplicación mediante un dispositivo electrónico. Para la ejecución del proyecto se realizará un análisis de criticidad, identificando el contexto operativo actual de una estación de bombeo, para solucionar esta problemática, permitiendo la aplicación de procesos sistémicos y estructurados de mantenimiento.

El desarrollo de esta Web App será útil para formato de computadora, tablet y smartphome, gratuitas o de muy bajo costo. El Proceso RCM será realizado de conformidad a las Normas: SAE JA1011, SAE JA1012, SAE JA1739, ISO 14224, ISO/IEC 60812.

## **1.1 Objetivo general**

Crear una aplicación Web App que nos permita implementar la metodología RCM a un sistema de bombeo, con el fin de disminuir el costo y el tiempo de mantenimiento.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Desarrollo de una plantilla automatizada para el contexto operacional de la estación de bombeo.
2. Elaboración del diagrama EPS y determinación de ítems mantenibles para la estación de bombeo.
3. Determinar las funciones y fallas funcionales de los ítems mantenibles que conforman la estación de bombeo.
4. Desarrollo de un cuadro AMFE para la estación de bombeo.
5. Desarrollo del árbol de decisión automatizado con aplicaciones Web App para definir las tareas optimas de mantenimiento.

## **1.3 Alcance**

Para el presenta proyecto se desarrollarán las siguientes actividades, por cada uno de los objetivos específicos:

Objetivo específico 1 (OE1): Desarrollo de una plantilla automatizada para el contexto operacional de la estación de bombeo, tendrá las siguientes actividades:

- Actividad (A1.1): Levantamiento de información general de la estación de bombeo.
- Actividad (A1.2): Evaluación y sistematización de la información obtenida.
- Actividad (A1.3): Registrar una plantilla automatizada de la estación de bombeo mediante Excel, en base a la información recopilada.

Objetivo específico 2 (OE2): Elaboración del diagrama EPS y determinación de ítems mantenibles para la estación de bombeo; se realizarán las siguientes actividades:

- Actividad (A2.1): Identificar los principales procesos que conforman la estación de bombeo.
- Actividad (A2.2): Establecer en base a las normas ISO los ítems mantenibles para la estación de bombeo, mediante el mantenimiento correctivo o preventivo.

Objetivo específico 3 (OE3): Determinar las funciones y fallas funcionales de los ítems mantenibles que conforman la estación de bombeo, se realizarán las siguientes actividades:

- Actividad (A3.1): Identificar las fallas funcionales y los modos de falla de cada componente, mediante información proporcionada por el operador, en catálogos o mediante análisis de datos.
- Actividad (A3.2): Elaboración de un reporte con información de las funciones y fallas funcionales.

Objetivo específico (OE4): Desarrollo de un cuadro AMFE para la estación de bombeo, para lo cual se realizarán las siguientes actividades:

- Actividad (A4.1): Detallar los modos de fallos existentes de todos los componentes que conforman el sistema de bombeo.
- Actividad (A4.2): Análisis de los efectos y consecuencias de los fallos encontrados.
- Actividad (A4.3): Presentar un cuadro AMFE a partir de la información recopilada anteriormente.

Objetivo específico (OE5): Desarrollo del árbol de decisión automatizado con aplicaciones Web App para definir las tareas optimas de mantenimiento. Para esto para se realizarán las siguientes actividades:

- Actividad (A5.1): Definir el objetivo principal y todas las actividades principales del mantenimiento centrado en confiabilidad que se ubicaran en los nodos de decisiones.
- Actividad (A5.2): Categorizar las ramas y nodos que se presentarán en los posibles caminos que podemos elegir a partir del nodo de decisión inicial, en base al análisis de funciones y fallos correspondiente.
- Actividad (A5.3): Elaboración del árbol de decisión automatizado con aplicaciones Web App

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1. Definición de Mantenimiento**

Se define al mantenimiento con la disciplina que abarca un conjunto de operaciones, cuidados y funciones aplicadas de forma científica, técnica y creativa. Donde su objetivo es mantener los equipos y maquinarias en condiciones óptimas de operación a través de pruebas, servicios, ajustes, inspecciones, reemplazos, calibraciones, reconstrucciones y reparaciones.

### **1.4.2. Evolución del mantenimiento**

- **Primera Generación**

Se desarrolla durante el periodo de la II Guerra Mundial, donde la industria no estaba mecanizada, por lo cual los periodos de suspensión de trabajo no tenían mucha importancia, teniendo maquinarias sencillas y tenían una función definida, motivo por el cual su manejo era simple además de ser confiable y fácil de reparar. (Moubray, 1997)

Característica: Reparación de fallas.

Estrategias y Tipos de Mantenimiento: Mantenimiento Correctivo, Tecnologías de reparación.

- **Segunda Generación**

En tiempos de guerras se desarrolló un incremento en la producción de todo tipo de materia prima, siendo la industria la mayor afectada por la pérdida de mano de obra lo que obligó a la implementación de maquinarias mecanizadas más complejas, permitiendo el aumento del tiempo de producción volviéndose indispensable estos tipos de mecanismos. (Moubray, 1997)

Característica: Planificación y control.

Estrategias y Tipos de Mantenimiento: Mantenimiento preventivo periódico, Sistemas de planificación y control del mantenimiento.

- **Terca Generación**

Característica: Monitoreo, diagnostico, prevención y predicción.

Estrategias y Tipos de Mantenimiento: Mantenimiento preventivo por diagnóstico de condición, Mantenimiento predictivo, Índices de Mantenimiento y Confiabilidad Estadística.

- **Cuarta Generación**

Característica: Enfoque holístico y sistemático.

Estrategias y Tipos de Mantenimiento: Confiabilidad Operacional, Mantenimiento Productivo Total (TPM), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y sistematización de la Ingeniería de Mantenimiento.

- **Quinta Generación**

Característica: Inteligencia Artificial.

Estrategias y Tipos de Mantenimiento: Mantenimiento Inteligente. Industria 4.0.

### **1.4.3. Tipos de Mantenimiento**

En la ingeniería del mantenimiento se tiene como fin lograr sus objetivos a través de una combinación de acciones, actividades y tareas que afectan directamente a los sistemas y procesos industriales. Estas acciones se las realizan con las prácticas de mantenimiento, que se categorizan en tres tipos: mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. (Dacheng Li, 2010)

- **Mantenimiento Correctivo**

Se conoce como mantenimiento proactivo y se caracteriza por corregir errores o errores que ya han ocurrido, una vez identificado el problema este se lo lleva a cabo sin planificación previa. También, implica desmontar, reparar, cambiar, montar, experimentar, calibrar, entre otras opciones. Aunque tiene altos costos esto como resultado a la mala planificación y las interrupciones inesperadas, hay otros casos en los que el impacto es menor en la producción y se usa para extender la vida útil de los componentes. El objetivo es usarlo lo menos posible y priorizar los esfuerzos de mantenimiento preventivo.

- **Mantenimiento Preventivo**

El mantenimiento preventivo se realiza de forma planificada y con el objetivo de prevenir el mal funcionamiento y daños de los equipos y sistemas. Su implementación adecuada puede prolongar la vida útil, mejorar el rendimiento, reduciendo costos y el tiempo de inactividad. Puede ser periódico o basado en diagnósticos de estado. El mantenimiento preventivo requiere planificación, programación y control, así como intervenciones y documentación de resultados para mejorar los procesos.

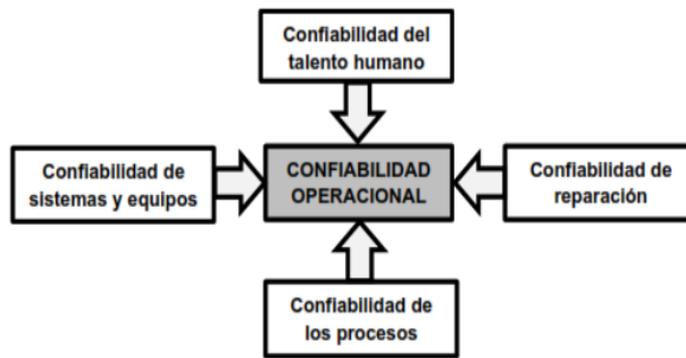
- **Mantenimiento Predictivo**

Se enfoca en predecir fallas globales en lugar de fallas de componentes individuales. Esto requiere herramientas apropiadas para el monitoreo continuo o periódico de los parámetros de desempeño. Las técnicas utilizadas incluyen análisis de vibraciones, ultrasonido, análisis de lubricantes, imágenes térmicas y medición de temperatura. A diferencia del mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo se limita a sistemas críticos con una larga vida útil.

- **Confiabilidad Operacional**

La confiabilidad es la capacidad de un sistema o proceso para operar sin fallas durante un período de tiempo específico. Esto es muy importante en áreas como la industria y la ingeniería, donde la falta de fiabilidad puede tener graves consecuencias. La confiabilidad operativa se refiere a la capacidad de los equipos industriales para realizar sus funciones dentro de las restricciones de diseño basadas en personas, sistemas y equipos, procesos y capacidad de reparación. Todo esto se analiza de manera integral para garantizar la confiabilidad operativa general.

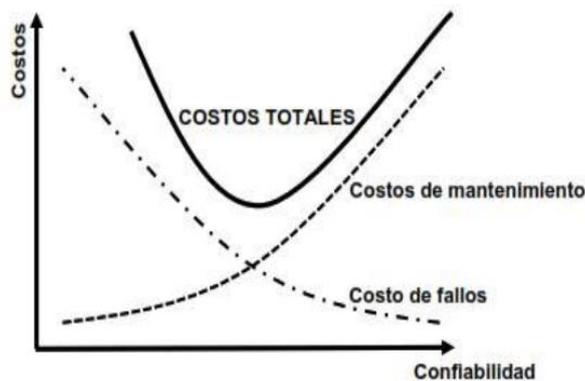
De manera holística la confiabilidad operacional se basa en la confiabilidad de cuatro componentes fundamentales:



**Ilustración 1.1** Componentes de la confiabilidad

- **Costo Óptimo**

Cada tarea de mantenimiento tiene un costo asociado, por lo que a medida que aumenta la cantidad de tareas de mantenimiento, también aumenta la confiabilidad del equipo. Por otro lado, la confiabilidad disminuye a medida que aumentan los errores y los problemas. Por lo que la curva de costo total tiene un punto mínimo donde se equilibran los costos de mantenimiento y los costos de falla. El objetivo no es encontrar matemáticamente el costo más bajo, sino desarrollar planes y procedimientos de mantenimiento óptimos para garantizar la confiabilidad operativa mínima necesaria para lograr la eficiencia y productividad deseadas en la planta al costo más bajo. Como se puede apreciar en el siguiente gráfico:



**Ilustración 1.2** Costos vs Confiabilidad

#### 1.4.4. Desgaste y Falla

Un fallo es la ruptura de un objeto o material, debido a diversos factores que afectan a la resistencia, la estabilidad y la composición química de la estructura (*Fallos y Modos de fallo ¿En qué consisten?*, 2021).

El desgaste se refiere a los cambios no deseados que ocurren gradualmente en el tamaño, forma o propiedades de una estructura, sistema o dispositivo, lo cual puede llevar a su eventual fallo.

##### 1.4.4.1. Procesos de Desgaste y Falla

- **Fricción**

Es una fuerza que se opone al movimiento relativo entre superficies sólidas, capas de fluido y elementos que se deslizan entre sí. Es el principal proceso de desgaste que ocurre en sistemas industriales, especialmente en cojinetes, rodamientos y otros componentes que experimentan fuerzas y movimiento relativo entre sí.

Causas:

- Diseño inadecuado de los cojinetes, que puede incluir problemas relacionados con materiales, dimensiones, tolerancias, entre otros.
- Selección incorrecta del lubricante utilizado.
- Presencia de suciedad y falta de viscosidad o capacidad lubricante del lubricante utilizado.
- Problemas en el sistema de lubricación, como filtros sucios, fugas, válvulas en mal estado, entre otros.

- **Corrosión**

Se le denomina al proceso de deterioro gradual de los materiales, especialmente los metales, debido a reacciones químicas con el entorno. Produciendo la pérdida de propiedades mecánicas de los componentes, lo que puede causar fallas en estructuras y componentes metálicos. La corrosión puede acelerarse por factores como altas temperaturas, presencia de ácidos y sales, y condiciones ambientales agresivas.

Causas:

- Deficiencias en el diseño o elección inadecuada de materiales, recubrimientos superficiales y protección catódica.
- Degradación de los recubrimientos superficiales.
- Problemas en el funcionamiento de la protección catódica.
- **Deformación plástica y rotura.**

Cuando se aplican cargas excesivas, se producen impactos o golpes, los materiales superan su límite elástico y experimentan deformaciones plásticas. Esto implica que se deforman de manera permanente y no pueden recuperar su forma original. La deformación plástica ocurre a nivel microscópico, donde los átomos o moléculas del material se mueven y reorganizan en nuevas posiciones.

**Causas:**

- Desequilibrio.
- Desajuste.
- Juego mecánico en cojinetes.
- Flexibilidad estructural.
- Excentricidad.
- Ejes deformados.
- **Problemas de Integridad.**

La integridad estructural es crucial para garantizar que una estructura o componente sea seguro, confiable y cumpla su función correctamente. Implica asegurarse de que pueda soportar sobrecargas dentro de límites técnicos establecidos. Es fundamental en diferentes campos de la ingeniería para garantizar la seguridad y confiabilidad de las estructuras y componentes utilizados.

**Causas:**

- Diseño deficiente y selección inadecuada de materiales.
- Procesos de fabricación inapropiados.
- Falta de control en otros procesos de desgaste y falla.

- **Fatiga Estructural.**

La fatiga estructural es un fenómeno en el que los materiales se rompen más fácilmente bajo cargas cíclicas que bajo cargas estáticas. Se produce la aparición y propagación de grietas en el material, lo que puede llevar al fallo del elemento. La vida útil de un componente está determinada por el número de ciclos de carga que puede soportar antes de fallar. La velocidad de crecimiento de las grietas depende del nivel de tensión aplicado y la amplitud de las tensiones cíclicas.

Causas:

- Sobreesfuerzos fluctuantes debido a problemas en el funcionamiento de la máquina.
- Exceder el límite de ciclos máximos antes de la fatiga o vida útil del componente.
- Diseño inadecuado del límite de fatiga de los materiales.
- Vibraciones de alta intensidad.

- **Fatiga Superficial.**

La fatiga superficial se trata del desgaste y agrietamiento que se produce en las capas exteriores de un material a causa de los esfuerzos fluctuantes durante el contacto de rodadura, como en los elementos rodantes de los rodamientos o entre los dientes de los engranajes.

Causas:

- Excesos de carga en rodamientos y engranajes.
- Sobrepassar el límite de ciclos permitidos antes de la fatiga o vida útil del componente.
- Diseño inadecuado del límite de fatiga de los materiales.
- Vibraciones de alta intensidad.

- **Fatiga térmica.**

Presente principalmente en máquinas térmicas que operan con fluidos líquidos y gaseosos a altas temperaturas. En estos sistemas, ocurren tensiones cíclicas debido a cambios repetitivos de temperatura en las paredes de los recipientes y fluidos. Estas fluctuaciones

térmicas generan tensiones debido a la dilatación y contracción de los materiales, lo cual puede provocar su fallo.

Causas:

- Cambios repetitivos de temperatura significativos.
- Diseño inadecuado de materiales y dimensiones de tuberías, recipientes, etc.
- **Explosiones e Incendios.**

En sistemas hidromecánicos, neumáticos, de gases comprimidos y térmicos, los incrementos rápidos de presión y temperatura de los fluidos representan un peligro potencial de explosiones e incendios. Para proteger estos sistemas, se utilizan elementos como presostatos, termostatos de seguridad, válvulas de seguridad y sistemas anticendios. Estos componentes reaccionan a valores predefinidos de sobrepresión y/o sobre temperatura, desactivando los sistemas y activando alarmas para tomar medidas de contingencia. Su correcto funcionamiento y dimensionamiento son cruciales para evitar consecuencias desastrosas.

Causas:

- Mal funcionamiento en elementos de protección.
- Componentes de protección con dimensiones inadecuadas.
- Contaminación en los componentes de protección.
- Componentes de protección deteriorados o desgastados.
- **Cavitación**

La cavitación es un desgaste que ocurre en bombas, turbinas y sistemas de transporte de líquidos. Se produce cuando la presión del líquido cae por debajo de su presión de vapor, generando burbujas de vapor que colapsan y erosionan el material circundante. La cavitación puede provocar pérdida de eficiencia, vibraciones, ruido y erosión. Es importante prevenir y mitigar estos efectos negativos en los equipos y sistemas afectados.

Causas

- Diseño deficiente de la altura de succión neta positiva NPSH.
- Rango de funcionamiento inapropiado.
- Alta temperatura del fluido.

- **Golpe de Ariete.**

Se lo denomina un fenómeno hidráulico causado por cambios bruscos de flujo en conductos. Esto genera ondas de alta presión que dañan tuberías y equipos. Suele ocurrir por cierres abruptos de válvulas y obstrucciones repentinas. Es importante controlar la velocidad de cierre de las válvulas para prevenir este problema.

Causas:

- Diseño deficiente de la ley de cierre.
  - Manejo inapropiado de las válvulas.
  - Bloqueos inesperados.
  - Fallos en los dispositivos de control.
- **Problemas Eléctricos.**

Los procesos eléctricos de desgaste y falla son comunes en sistemas eléctricos y pueden afectar componentes importantes, causando interrupciones y problemas en el funcionamiento. Es crucial contar con elementos de protección adecuados para evitar consecuencias negativas.

Causas:

- Zonas calientes debido a terminales o conexiones sueltas.
- Degradación de revestimientos aislantes.
- Cortocircuitos.
- Daño en cables y conductores.
- Desgaste de componentes en contacto.
- Protecciones excesivamente grandes.
- Fallos en dispositivos de protección.

#### **1.4.5. Causas de Fallos y soluciones**

Permiten mejorar los procesos y prevenir futuros problemas. Se recomienda recopilar datos, definir el problema y utilizar técnicas como los diagramas de Pareto y de Ishikawa para identificar las causas directas de los fallos en cada sistema funcional.

Para el análisis sistémico de causas de fallo la ingeniería de mantenimiento recomienda seguir los siguientes pasos:

- Recopilación de datos
- Definición del problema
- Análisis de la falla
- Investigación adicional
- Acciones correctivas
- Monitoreo y seguimiento
- Mejora continua

#### **1.4.5.1. Técnicas o Herramientas.**

- **Diagrama de Pareto**

Es una herramienta visual utilizada en ingeniería de mantenimiento con el fin de identificar y priorizar los problemas más importantes en una máquina o sistema. Para lo cual se requiere de la recopilación de datos en un período significativo y muestra las causas o problemas más frecuentes en orden descendente. Ayuda a enfocar los esfuerzos en los problemas que tienen un mayor impacto.

Los pasos para crear un diagrama de Pareto son los siguientes:

- Obtener los datos de un período significativo o de los manuales de mantenimiento.
- Determinar la frecuencia o impacto de cada problema.
- Ordenar los problemas de mayor a menor frecuencia o impacto.
- Crear un gráfico de barras con el eje vertical representando la frecuencia o impacto.
- Dibujar la línea de Pareto trazando una línea acumulativa a lo largo de las barras.
- Interpretar el diagrama, dando prioridad a los problemas a la izquierda del gráfico.

- **Diagrama de Ishikawa**

Es una herramienta visual utilizada en ingeniería de mantenimiento para identificar problemas y fallas en sistemas industriales. Permite analizar los sistemas funcionales y seleccionar los problemas más frecuentes. La información necesaria se encuentra en

manuales técnicos y de operación. Es importante no sobrecargar el diagrama y priorizar los componentes. Ayuda a resolver problemas de mantenimiento y encontrar las causas de raíz.

- **Análisis de Causa Raíz**

El Análisis de Causa Raíz (ACR) es una metodología que busca identificar las causas fundamentales de un problema o evento no deseado. Se utiliza en la ingeniería de mantenimiento para encontrar las causas directas e intermedias de problemas comunes y las causas raíz de problemas críticos en equipos y sistemas industriales. El ACR ayuda a encontrar soluciones efectivas para minimizar o eliminar los problemas y sus efectos negativos. El Análisis de Causa Raíz es un proceso de deducciones lógicas que permite graficar las relaciones causa-efecto que nos conducen a identificar y determinar las causas de los problemas, por esta razón en la ingeniería de mantenimiento el RCA aplica el método de los "5 por qué" es una técnica que consiste en hacer repetidamente (5 veces) la pregunta "¿por qué?".

- **Método de los "5 por qué"**

Es una técnica que consiste en hacer repetidamente (5 veces) la pregunta "¿por qué?" para identificar primeramente las causas directas e intermedias y en caso de que amerite encontrar la causa raíz de un problema o evento no deseado. Es importante destacar que el número "5", en el método de los 5 por qué, no es una regla estricta. Se pueden hacer menos o más de cinco rondas de preguntas según sea necesario. El objetivo es llegar a una causa que explique el problema de manera completa y satisfactoria, para desarrollar correctivos y soluciones efectivas a los problemas.

Cuando se identifica la causa raíz, esta debe ser clasificada en alguno de los tipos siguientes, para facilitar determinar el correctivo o solución a esta causa raíz:

- Causa raíz física: Es la causa tangible de porqué está ocurriendo una falla. Siempre proviene de una raíz humana o latente. Son las más fáciles de tratar y siempre requieren verificación.
- Causa raíz humana: Es producto de errores humanos motivados por sus inapropiadas intervenciones. Nacen por la ausencia de decisiones acertadas, que pueden ser por convicción u omisión. Nunca utiliza nombres individuales o grupales cuando se especifica la causa.

- Causa raíz latente: Son producto de la deficiencia de los sistemas de información. Proviene de errores humanos. En ciertas ocasiones afectan más que el problema que se está estudiando, ya que pueden generar circunstancias que ocasionan nuevas fallas.

#### **1.4.5.2. Solución para causa de fallos**

Para solucionar los problemas de desgaste y falla en máquinas y sistemas industriales, se recomienda seguir estos pasos:

- Formar un equipo multidisciplinario.
- Obtener los recursos necesarios.
- Realizar correcciones urgentes para evitar daños adicionales.
- Implementar soluciones permanentes basadas en las causas raíz identificadas.
- Monitorear y evaluar los resultados de las soluciones implementadas.
- Buscar continuamente oportunidades de mejora.

Al abordar las causas fundamentales en lugar de los síntomas superficiales, se puede resolver los problemas de manera más efectiva y mejorar la calidad y el rendimiento general.

#### **1.4.6. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).**

##### **1.4.6.1. Origen**

En la década de los 60's, la industria aeroespacial buscaba mejorar la confiabilidad y seguridad de los sistemas complejos, lo que dio paso al desarrollo del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Boeing y la Fuerza Aérea de los Estados Unidos colaboraron con otras organizaciones para crear el RCM, que se basaba en identificar las funciones críticas de un sistema y determinar las tareas de mantenimiento necesarias para garantizar su confiabilidad. Se enfocaba en analizar los modos de fallo, evaluar las estrategias de mantenimiento existentes y logró reducir significativamente los accidentes aéreos. (Engineers, SAE JA1011: Evaluation, 2009)

A medida que el RCM se implementaba en la industria aeroespacial, su éxito se hizo evidente y se extendió a otros sectores. En la década de los 80's, se establecieron principios y pautas para su implementación a través de la norma IEC 60300-3-11. En la década de los 90's, el RCM se reconocía como una metodología integral para la gestión

del mantenimiento y la confiabilidad de los activos. John Moubray, autor del libro "Reliability-Centered Maintenance", se convirtió en un referente en el campo y su trabajo contribuyó al crecimiento y divulgación del RCM en la industria del mantenimiento y la confiabilidad de los activos. (Moubray, 1997)

#### **1.4.6.2. Definición del RCM.**

el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una metodología sistemática que se centra en las tareas esenciales para asegurar la confiabilidad de los equipos. Se basa en un análisis detallado de los modos de fallo y su importancia, permitiendo determinar las acciones de mantenimiento adecuadas para que los activos físicos sigan cumpliendo su función en su entorno operativo actual. (Mora-Gutiérrez, 2009).

#### **1.4.6.3. Normas RCM**

Las normas que regulan la metodología del RCM son las siguientes, entre las más importantes:

- IEC 60300-3-11 - Application guide – Reliability Centred Maintenance
- SAE JA1011 - Evaluation Criteria for Reliability Centered Maintenance (RCM) Processes.
- SAE JA1012— A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM).
- SAE JA1739 — Potential failure mode and effects analysis in design and Potential failure mode and effects analysis in manufacturing and assembly processes (process FMEA reference manual).
- ISO 14224. — Petroleum and natural gas industries— Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. (Engineers, SAE JA1011: Evaluation, 2009)

#### **1.4.6.4. Las siete preguntas básicas del RCM**

1. ¿Cuál es la función?, Lo que el usuario desea que la máquina haga.
2. ¿Cuál es la falla funcional?, Razones por las que deja de hacer lo que el usuario desea que haga.
3. ¿Cuál es el modo de falla?, Que pudo causar la falla funcional.
4. ¿Cuál es el efecto de la falla?, Que ocurre cuando la falla se produce.

5. ¿Cuál es la consecuencia de la falla?, Razones por las que importa que falle.
6. ¿Qué se puede hacer para evitar o minimizar la consecuencia de la falla?
7. ¿Qué se hace si no se encuentra ninguna tarea para evitar o minimizar la consecuencia de la falla?. (Engineers, SAE JA1011: Evaluation, 2009)

#### **1.4.6.5. Pasos para implementación del RCM**

- Determinación del contexto operacional.
- Diagrama de entradas procesos y salidas EPS y definición de ISED's.
- Identificar las funciones clave para los ISED's.
- Determinar las fallas para los ISED's.
- Análisis Modal de fallos y efectos AMFE.
- Identificar las estrategias de mantenimiento y correctivos AMFE.
- Evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento.

#### **1.4.6.6. Definición del contexto operacional**

Hace referencia a comprender completamente cómo se utiliza y opera un activo o sistema específico. Al iniciar el proceso de RCM, es importante tener una comprensión clara del contexto operacional. Esto incluyen factores como el ciclo de vida, modos y condiciones de operación, redundancia de procesos o activos, estándares de calidad y ambientales, riesgos de seguridad, turnos de trabajo, productos en proceso, tiempos de reparación, disponibilidad de repuestos, demanda de mercado y abastecimiento de materias primas. El análisis de estos factores permite establecer estrategias de mantenimiento adecuadas y optimizadas para garantizar la confiabilidad y el desempeño del activo en su entorno operativo. (Engineers, SAE JA1011: Evaluation, 2009)

#### **1.4.6.7. Diagrama EPS y definición de ISED'S**

Permite el análisis detallado del Contexto Operacional en el proceso RCM, desglosando la planta de producción en sus componentes clave, desde la planta hasta los sistemas y los ISED's. Esta división debe realizarse cuidadosamente para garantizar que se incluyan todos los elementos relevantes, sin complicar excesivamente el análisis. Además, se pueden considerar aspectos adicionales como seguridad industrial y elementos misceláneos, mientras que la gestión del mantenimiento y la logística pueden ser tratadas como componentes dentro de los procesos administrativos y de calidad de la planta.

#### **1.4.6.8. Funciones de los ISED's**

Se define como las actividades que se realizan para cumplir con los objetivos del sistema, proceso o planta. Se distingue entre funciones principales y secundarias. La descripción de una función debe incluir un verbo, un objeto y un estándar de desempeño que establece los criterios de evaluación. Los estándares de desempeño pueden ser cualitativos, cuantitativos o rangos múltiples, proporcionando una referencia clara para determinar si el ISED está funcionando adecuadamente o está en riesgo de falla.

#### **1.4.6.9. Modo de falla de los ISED's**

El modo de falla de un sistema se refiere a la forma en que el sistema puede dejar de funcionar o a su vez operar por debajo de los estándares establecidos. Representa la manifestación específica de una falla o problema en el ISED. Se puede describir el modo de falla como una explicación clara y precisa de cómo y por qué ocurre la falla en el sistema.

El modo de falla también se puede definir como el estado en el que un ISED no está disponible para cumplir con sus funciones principales y/o secundarias, según el nivel de operatividad establecido por los estándares de desempeño. En otras palabras, es necesario definir un modo de falla para cada estándar de desempeño de todas las funciones establecidas para cada ISED.

Por otro lado, las fallas funcionales ocultas se refieren a los defectos y problemas que existen en un sistema o producto, pero que no se manifiestan de inmediato o de manera evidente durante su funcionamiento normal. Estas fallas no son fácilmente detectables a simple vista o mediante pruebas convencionales. Pueden surgir debido a problemas de diseño, errores en la fabricación, deficiencias en los procesos de calidad y otros factores. Estas fallas pueden permanecer latentes en el sistema hasta que ciertas condiciones o eventos las revelen.

#### **1.4.6.10. Causas de fallas y solución**

Identificar y comprender estas causas es fundamental para tomar medidas correctivas y evitar futuros problemas, ya que es necesario un enfoque sistémico que analice tanto los factores inmediatos como las causas más profundas. Para problemas comunes, no es necesario llegar a la causa raíz, basta con encontrar una causa directa o intermedia para

determinar una solución. Sin embargo, en problemas críticos, se requiere encontrar la causa raíz y utilizar los correctivos adecuados para resolver el problema.

#### **1.4.6.11. Consecuencias de las fallas**

Las consecuencias podrían surgir debido a una falla, los cuales pueden ser funcionales, de seguridad, económicos u otros, según la naturaleza del sistema. Estos efectos pueden afectar la operatividad de un sistema, poner en peligro a otros equipos o infraestructuras, y en casos más graves, amenazar la seguridad o incluso la vida de las personas.

La descripción de los efectos de las fallas abarca los eventos secuenciales desde el inicio de la falla hasta la pérdida total o parcial de funciones del elemento analizado. Las consecuencias se evalúan considerando su impacto en diferentes áreas:

- **Consecuencias de seguridad:** Si una falla puede causar daño o poner en peligro la vida de los seres humanos, se considera una consecuencia contra la seguridad.
- **Consecuencias ambientales:** Si una falla puede violar normativas ambientales corporativas, municipales, regionales, nacionales o internacionales, se clasifica como una consecuencia ambiental.
- **Consecuencias operativas:** Las fallas que afectan la capacidad operativa de un sistema, incluyendo producción, calidad del producto, servicio al consumidor, entre otros, son consideradas consecuencias operativas. Esto también puede incluir costos adicionales además de los de reparación.
- **Consecuencias no operativas:** Las fallas que no afectan directamente la seguridad, el medio ambiente o la operatividad se clasifican como no operativas. Estas consecuencias están relacionadas principalmente con costos económicos, incluyendo reparación y daños secundarios.

#### **1.4.6.12. Gravedad, Frecuencia y Detectabilidad**

Una vez que se ha identificado el modo de falla, sus causas y soluciones, así como sus efectos, se procede a evaluar la criticidad de cada falla utilizando tres índices: gravedad (G), frecuencia (F) y detectabilidad (D).

- **El índice de gravedad (G):** evalúa la severidad del efecto del fallo y su impacto en las consecuencias. Se emplea una escala del 1 al 10, que indica desde daños menores hasta problemas graves de seguridad o incumplimiento normativo.

- **El índice de frecuencia (F):** mide la probabilidad de que ocurra un fallo y genere el modo de falla. Se aconseja registrar fallos previos para obtener datos históricos o estadísticos. Aquí, se considera el tiempo medio entre fallos (MTBF o MTTF) y se clasifica en una escala del 1 al 10.
- **El índice de detectabilidad (D):** evalúa la probabilidad de detectar la falla a tiempo para prevenir daños. Cuanto menor sea la capacidad de detección, mayor será el índice de detectabilidad y, por lo tanto, mayor la criticidad. También se usa una escala del 1 al 10 para su clasificación.

#### **1.4.6.13. Índice de prioridad de riesgo (IPR)**

medida que tiene en cuenta los índices de Gravedad, Frecuencia y Detectabilidad para evaluar el riesgo general de una falla. Matemáticamente, se calcula multiplicando estos tres índices juntos:

$$\text{IPR} = \text{G} * \text{F} * \text{D}.$$

El valor del IPR se utiliza para tomar decisiones sobre las acciones correctivas necesarias: Cuando el valor del IPR es inferior a 100, no se consideran necesarias las acciones correctivas según el método AMFE.

Si el valor del IPR es igual o mayor a 100, se recomiendan acciones correctivas según el método AMFE.

#### **1.4.6.14. Correctivos AMFE para IPR > 100**

Cuando el valor del IPR es igual o mayor a 100, se requieren "acciones correctivas AMFE" para reducir los índices de frecuencia y detectabilidad, ya que el índice de gravedad no es modificable. Las acciones sugeridas para reducir estos índices incluyen:

1. Aumentar la frecuencia de inspecciones.
2. Mejorar la calidad y cantidad de los instrumentos de medición.
3. Realizar cambios en los procesos.
4. Rediseñar componentes y partes.
5. Implementar mantenimiento predictivo (solo en sistemas principales).

#### **1.4.6.15. Selección de tareas**

Después del análisis AMFE, se escogen tareas de mantenimiento considerando viabilidad técnica y beneficios. Si  $IPR \geq 100$ , se busca reducir índices de Frecuencia y Detectabilidad. Luego, se evalúa Costo-Beneficio y tiempo de uso frente a la falla para seleccionar tareas. Estrategias varían según impacto:

- **Fallas con Consecuencias Graves:** Se reducen con mantenimiento preventivo basado en condición, si factible.
- **Fallas Ocultas Graves:** Inspecciones priorizadas y mantenimiento para evitar fallas.
- **Fallas con Consecuencias Económicas:** Tareas menores que costos de consecuencias. Mantenimiento preventivo o correctivo, rediseño si necesario.
- **Fallas Ocultas Económicas:** Tareas asequibles frente a costos totales de falla detectada. Similar a estrategias previas.
- **Fallas Leves:** Mantenimiento correctivo, maximizando vida útil.

#### **1.4.6.16. Plan de mantenimiento óptimo (PMO)**

El Plan de Mantenimiento Óptimo (PMO) implica una planificación estratégica y completa de actividades de mantenimiento mínimas necesarias para garantizar la confiabilidad de equipos e instalaciones industriales. Incluye detalles como descripción de tareas, recursos, duración y frecuencia. El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es un proceso estructurado que mejora la confiabilidad y disponibilidad de instalaciones, demostrando beneficios notables en diversas industrias. RCM y PMO requieren manejar gran cantidad de datos e interconexiones, lo que sugiere automatizarlos en sistemas de información con interfaces amigables.

Aunque erróneamente se considera que RCM y PMO son costosos y complejos, gracias al avance tecnológico, es posible sistematizarlos y automatizarlos para industrias de todos los tamaños. Desde grandes empresas hasta pequeños emprendimientos, pueden beneficiarse mediante hojas de cálculo, bases de datos y aplicaciones Web App. Esta automatización optimiza el mantenimiento y la productividad en diversas instalaciones industriales.

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo metodológico de este proyecto, se empleó de forma sistematizada la herramienta Excel en la creación de la aplicación web. También con el fin de optimizar las labores de mantenimiento y la confiabilidad operacional de los activos, se elaboró un Plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad y luego con base en la información recopilada, se definieron óptimamente las tareas y frecuencias de mantenimiento en un Plan de Mantenimiento Óptimo.

Para esto inicialmente, se estableció el contexto operativo en base al sistema de deshidratación de crudo de la Estación AUCA51 de Petroecuador, una planta que opera de la siguiente manera:

El fluido trifásico es producido desde las formaciones mediante equipos electro sumergibles que ingresan al separador trifásico, el cual aísla el fluido en sus componentes de agua de formación, crudo y gas, en una primera etapa, con un porcentaje aproximado de 20% de BSW (porcentaje de agua en el crudo).

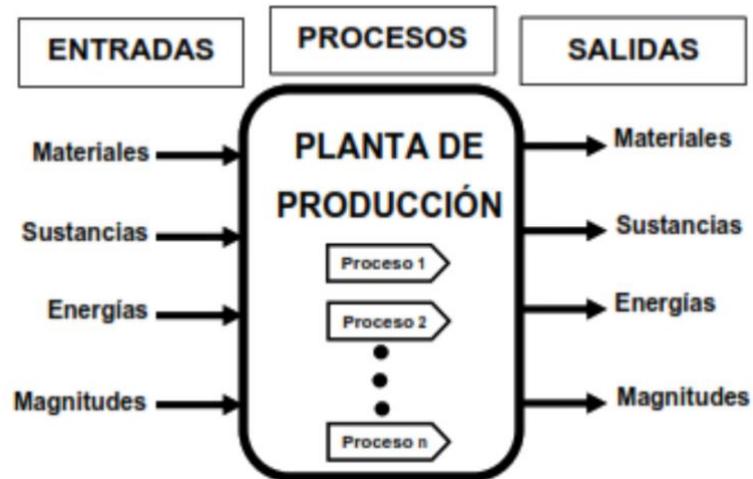
Posteriormente, el fluido pasa por el calentador y luego al separador electrostático con un porcentaje de BSW permitido para exportación (menor al 1% de BSW). El crudo sale al tanque de almacenamiento para luego ser transferido por oleoducto. Además, el diseño de la planta de deshidratación, especialmente en los recipientes, cuenta con cubetos construidos con una capacidad del 110% del recipiente más crítico, en cumplimiento de la norma ISO 14001.

En base a la información proporcionada por la planta, se elaborará el contexto operacional mediante una tabla en Excel, que contendrá la siguiente información como se muestra en la tabla 2.1:

**Tabla 2.1.** Contexto Operacional

CONTEXTO OPERACIONAL
PLANTA:
Datos Generales:
Descripción Breve:
Contexto Técnico:
Estándares de calidad:
Estándares medio ambientales:
Turnos de trabajo:
Mantenimiento:
Demanda del mercado:

Después de esto se procede a realizar el diagrama de entrada – proceso – salida para la planta de deshidratación de crudo, en el cual se definió los materiales, sustancias, energías y magnitudes de los insumos o materias primas que requieren los procesos de la planta productiva, utilizando este formato de diagrama como se muestra en la ilustración 2.



**Ilustración 2.** Costos vs Confiabilidad

Tras conocer el contexto operativo, se procedió a elaborar otra tabla en Excel para definir los ISED's, para procesar detalladamente la información del Contexto Operacional. A través de una meticulosa investigación y con los datos suministrados, se consideraron todos los procesos y sistemas con sus respectivos componentes clave e ISED's, que conforman la planta de deshidratación AUCA51. Esta tabla exhaustiva nos permite completar la siguiente información como indica la tabla 2.2.:

**Tabla 2.2.** Definición de ISED'S

PLANTA:			
PROCESOS	SISTEMAS	COMPONENTES CLAVES	ISEDS

No obstante, la gran amplitud de este trabajo, para practicidad sólo se considerará el siguiente proceso de transferencia de crudo, el cual se elaborarán las funciones y modos de falla del conjunto de actividades realizadas por cada ISED.

Las funciones se llevaron a cabo mediante estándares cualitativos, cuantitativos y múltiples. Así mismo, cada modo de falla fue descrito con rigor en términos físicos, técnicos, de desempeño (total o parcial) y efecto (evidente u oculto) según corresponda.

Con esta información meticulosa, se procederá a completar la siguiente tabla 2.3.:

**Tabla 2.3.**Funciones y modos de falla

PLANTA:		
ISED'S	FUNCIONES	MODOS DE FALLA

Una vez determinado los modos de falla, se debe obtener la causa directa, diagnóstico, causa raíz y solución respectiva para cada uno de ellos. Para lo cual, se emplearon funciones de listas desplegables independientes y dependientes en Excel, facilitando el ingreso de datos, evitar errores, ahorrar tiempo, mejorar la presentación de las hojas de cálculo y gestionar de mejor manera la información de acuerdo con su causa raíz seleccionada y a sus posibles alternativas. Tal como se puede apreciar en las tablas 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 a continuación:

**Tabla 2.4.**Causas directas.

Fallas
Fricción
Corrosión
Deformación_plástica_rotura
Fatiga_estructural
Fatiga_superficial
Fatiga_térmica
Explosiones_incendios
Cavitación
Golpe_ariete
Problemas_eléctricos

**Tabla 2.5.**Tipos de Diagnostico

Diagnóstico
Inspección y diagnóstico visual.
Medición y análisis de parámetros operativos.
Medición y análisis de vibraciones.
Ensayos no destructivos
Inspección y análisis de lubricantes.
Termografía.
Detección y diagnóstico de fallas eléctricas

**Tabla 2.6.**Causas de falla por corrosión.

Corrosión
Mala selección de materiales
Mal recubrimiento superficial
Mala pintura
Deterioro de recubrimiento superficial o pintura
No hay protección catódica
Mal funcionamiento de la protección catódica

**Tabla 2.7.**Posibles Soluciones

Soluciones
Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas

Establecidas las tablas para cada uno de los distintos tipos de fallas y sus alternativas que podrían suscitarse en este proceso, se realizó el llenado de la tabla 2.8, de cadena de causas de falla y soluciones de todos los modos de falla presentes.

**Tabla 2.8.** Cadena de causas de falla y Soluciones por corrosión.

PLANTA:				
MODO DE FALLA:	CAUSA DIRECTA:	DIAGNÓSTICO:	CAUSA DE FALLA:	SOLUCIÓN
Corrosión - parcial y evidente	Corrosión	Inspección y diagnóstico visual.	No hay protección catódica	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas

Una vez identificado el modo de falla, sus causas con las respectivas soluciones y efectos o consecuencias, es preciso cualificar y cuantificar la criticidad de cada una de las fallas. Para ello, se emplearon los índices de gravedad (G), frecuencia (F) y detectabilidad (D) de la falla, con una puntuación de 1 a 10 para cada índice, utilizando las tablas 2.9, 2.10 y 2.11 de clasificación:

**Tabla 2.9.** Severidad del índice de Gravedad (G).

Gravedad
1 Ninguna consecuencia
2 Casi ninguna consecuencia
3 Disminución eficiencia leve
4 Disminución eficiencia alta
5 Paros no planificados leves
6 Paros no planificados altos
7 Violación de normas de higiene o ambientales
8 Peligro seguridad humana leve
9 Peligro seguridad humana grave
10 Peligro seguridad humana muerte

**Tabla 2.10.** Probabilidad del índice de Frecuencia (F).

Frecuencia
1 Nunca
2 Casi nunca
3 Muy baja
4 Baja
5 Moderada baja
6 Moderada
7 Moderada alta
8 Alta
9 Muy alta
10 Extremadamente alta

**Tabla 2.11.** Probabilidad del índice de Detectabilidad (D).

Detectabilidad
1 Totalmente detectable
2 Muy detectable
3 Detectable
4 Moderada con patrones
5 Moderada sin patrones
6 Poco detectable
7 Muy poco detectable
8 Difícil de detectar
9 Muy difícil de detectar
10 No se detecta

Mediante el uso adecuado de la herramienta Excel, el valor de estos índices permitió hallar el Indicador de Prioridad de Riesgo (IPR) y determinar la necesidad de implementar acciones correctivas AMFE.

Con toda esta información recabada, se completará la tabla 2.12 de Análisis Modal de Falla y Efecto AMFE.

**Tabla 2.12.** Cuadro de Análisis Modal de Falla y Efecto AMFE.

PLANTA:							CORRECTIVOS AMFE					
MODO DE FALLA:	CAUSA DE FALLA:	GRAVEDAD DE FALLA:	G	FRECUENCIA DE FALLA:	F	DETECTABILIDAD:	D	IPR	ACCIONES CORRECTIVAS AMFE:	F	D	IPR
								0				0
								0				0

Una vez culminado el análisis modal de falla y efecto AMFE, se seleccionaron las tareas o acciones, estrategias, personal y materiales de mantenimiento que se deben ejecutar para cada modo de falla. Para ello, fue necesario considerar las tablas 2.13, 2.14, 2.15 y 2.16:

**Tabla 2.13.** Cuadro de tareas de mantenimiento.

Tarea
Periódica de Inspección
Periódica de cambio
Correctiva AMFE
Periódica de Reparación
Específica de Inspección
Específica de Cambio
Específica de reparación

**Tabla 2.14.** Cuadro de estrategias de mantenimiento.

Estrategia
Mantenimiento Correctivo
Mantenimiento Preventivo Inspección Diagnóstico
Mantenimiento Preventivo Reparación Cambio
Mantenimiento Predictivo
Acción correctiva AMFE

**Tabla 2.15.** Cuadro de personal de mantenimiento.

Personal
Equipo de trabajo 1
Equipo de trabajo 2
Equipo de trabajo 3
Trabajo tercerizado
Supervisor

**Tabla 2.16.** Cuadro de materiales de mantenimiento.

<b>Materiales</b>
Materiales repuestos herramientas 1
Materiales repuestos herramientas 2
Materiales repuestos herramientas 3
Materiales repuestos herramientas 4
Materiales repuestos herramientas 5
Materiales repuestos herramientas 6
Materiales repuestos herramientas 7

Con base en toda esta información recopilada meticulosamente, se procedió en el programa Excel, mediante funciones independientes y dependientes, a completar los diferentes correctivos AMFE con sus respectivas alternativas para finalmente llenar la tabla 2.17 del Plan de Mantenimiento Óptimo (PMO):

**Tabla 2.17.** Plan de Mantenimiento Óptimo

PLAN DE MANTENIMIENTO ÓPTIMO									
PLANTA:									
ID. TAREA	SOLUCIÓN / CORRECTIVO AMFE:	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA:	TIPO DE TAREA:	ESTRATEGIA DE LA TAREA:	TAREAS ASOCIADAS:	MTTR	MTTF - MTBF	PERSONAL	HERRAMIENTAS MATERIALES REPUESTOS:
1									
2									
3									

Finalmente, se procedió de manera inmediata a subir todas las tablas Excel elaboradas completamente al programa Google Sheets, el cual nos permitió desarrollar el árbol de decisión automatizado para la creación de una Web App.

### 3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

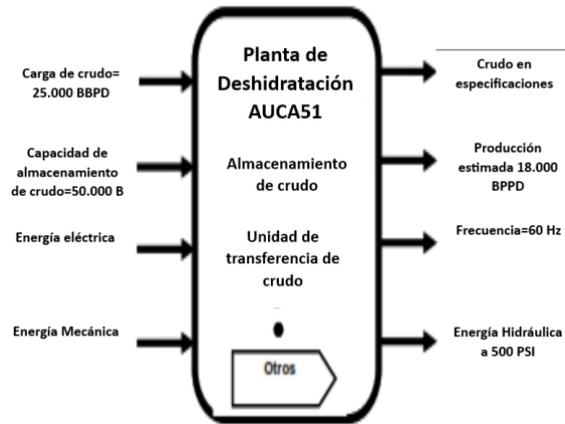
#### 3.1. Resultados

A continuación, la tabla 3.1.1 resultante del contexto operacional de la planta de deshidratación de crudo de Petroecuador estación AUCA51:

**Tabla 18** Contexto Operacional de la estación de bombeo AUCA51 de Petroecuador.

CONTEXTO OPERACIONAL	
Planta: Deshidratación de crudo AUCA1	
Datos Generales	
Nombre: PETROECUADOR	
Ubicación: AUCA 51	
Datos de la Central: La ESTACION AUCA 51 PLANTA DE DESESHDRATACION Y PROCESAMIENTO DE CRUDO.	
Descripción Breve:	
<p>Petroecuador AUCA 51, es una planta de deshidratación de crudo, la cual, opera de la siguiente manera: el fluido trifásico se produce desde las formaciones por medio de equipos electrosumergibles, los mismos, que ingresan al separador trifásico, mismo que separa el fluido trifásico, es decir agua de formación, crudo y gas, en su primera fase, con un porcentaje aproximado del 20% de BSW (Porcentaje de agua en el crudo). Luego, el fluido ingresa al calentador y después al separador electroestático con un porcentaje de BSW permitido para la exportación (menor que el 1% de BSW). El crudo sale al tanque almacenamiento y luego se realiza la transferencia por el oleoducto.</p>	
Contexto Técnico	
Barriles producidos: 20.000 barriles de petróleo por día (BPPD)	
Tipo de Bombas: Bombas centrífugas multietapas SPLIT CASE	
Sepador Trifásico: Recipiente horizontal SLASH LXD 50ftX12 ft, 100PSI @ °F, 60.000 bfpd (barriles de fluido por día); 2.0 mmscd (millones de pies cúbicos por día)	
Calentador tratador electroestático: 1.DXL(12'-0"x60'-0" s/s), Presión de diseño 100PSIG @ 1250°F, Presión de operación 25-55PSIG @ 165.185°F, 22500 BFPD	
Tanque de almacenamiento: Techo cónico, Presión 4oz/in <sup>2</sup> (Vacio 4 oz/in <sup>2</sup> ) atm @ 180°F, 20.000 BPD	
Sistema de bombas BOWSTER de crudo: Bombas centrífugas API 610, 28.750 BPPD @ 150PSI	
Sistema de bombas de transferencia de crudo: Bombas centrífugas multietapas SPLIT CASE API 610, 25.000 BPPD @ 550PSI	
Material de tanque de almacenamiento: Placas de acero al carbono API 653	
Tubería del oleoducto: cedula 40	
Estándares de Calidad:	
Caudal medio anual de transferencia de crudo: 20.000 BPD	
Producción de crudo anual estimada: 240.000 BPD	
Cobertura de demanta anual: 240.000 BDP	
Producción de crudo en especificaciones: menor que el 1% de BWS	
Estándares Medioambientales:	
El agua producto de la separación del petróleo es tratada y reinyectada a los pozos inyectores, con lo cual, se cumplirá con la licencia ambiental otorgada a este proyecto.	
El diseño de la planta de deshidratación especialmente en los recipientes se tiene construido cubetos al 110% de la capacidad del recipiente más crítico en función de la norma ISO 14.001.	
Para el caso de incendios en la planta se considera el diseño de un sistema de coontraincendios, el cual, pueda mitigar los riesgos por la propia operación.	
El gas producido por la separación se lo utilizara en la generación de energía eléctrica, disminuyendo la emisión de gases al medio ambiente.	
Turnos de trabajo	
Tiempo de trabajo: 24 horas del día, los 7 días de la semana.	
Jornada laboral: Dos	
Turnos de trabajo: rotativos cada 12 horas.	
Intensidad de trabajo: Operación, Supervisión y control de la planta de deshidratación.	
Mantenimiento:	
Factor de planta: 75%	
Confiabilidad: 98 %	
Disponibilidad: 97%.	
Tiempo de reparación de las bombas BOOSTER: 1 año	
Tiempo de reparación de las bombas de transferencia: 3 años	
Tiempo de inspección del separador trifásico: 1 año	
Tiempo de inspección del calentador y separador electroestático: 1 año	
Tiempo de inspección del calentador y separador electroestático: 1 año	
Tiempo de inspección del tanque de almacenamiento: 5 años	
Tiempo de inspección de líneas áreas y enterradas: 1 año	
Tiempo de inspección del sistema eléctrico y control: 6 meses	

A partir de esta información se realizó el siguiente diagrama EPS para la planta de Deshidratación de crudo, el cual está representada en la siguiente figura:



**Ilustración 3.1.1.** Diagrama EPS para la planta de Deshidratación AUCA51.

A partir de ahí se definió los siguientes ISED's:

**Tabla 19** Definición de ISED's la estación de bombeo AUCA51 de Petroecuador.

PLANTA: Deshidratación de crudo AUCA51			
PROCESOS	SISTEMAS	COMPONENTES CLAVES	ISEDS
Almacenamiento de crudo	Tanque de almacenamiento	Paredes, Techo y fondo	
		Accesorio Entrada/Salida	
		Revestimiento interno	
	Medidores de Nivel	Sonda de Nivel	
		Indicador o pantalla	
		Sistema de alarma	
		Transmisor	
	Valvulas de Aislamiento	Cuerpo de la válvula	
		Actuador	
Componentes internos			
	Conexiones		
Unidad de Transferencia de crudo	Válvulas de control y seguridad(12)	Valvula de esfera abre cierra	Válvula
		Valvulas de control	
		Valvulas de seguridad	
		Valvulas de presión y vacío.	
		Tubería y accesorios	Tubería y accesorios
	Bomba 1 (2)	Bomba BOOSTER	Bomba BOOSTER
		Valvulas de Globo	Valvula de control de caudal
		Valvulas reguladoras de presión	
		Valvulas de aguja	
		Caja de rodamientos	Rodamientos
		Transmisión mecánica	Transmisión mecánica
	Bomba 2 (2)	Bomba de transferencia	Bomba de transferencia
		Valvulas de Globo	
		Valvulas reguladoras de presión	
		Valvulas de aguja	
Cojinetes		Cojinetes	
	Transmisión mecánica		
	Unidad de potencia hidráulica HPU	Unidad de potencia hidráulica HPU	
	Sistema enfriamiento	Sistema de enfriamiento	
Motor eléctrico (4)	Motor	Motor	
	Rodamientos		
	Accesorios motor		
Sistemas auxiliares	Regulación eléctrica	Sistema eléctrico	
	Sincronización eléctrica		
	Control y protección	Sistemas de control y protección	
	Sistema contra incendios	Sistema contra incendios	

Una vez adquiridos los ISED's en la tabla anterior se obtuvo la siguiente tabla de funciones y modos de falla:

**Tabla 20** Cadena Funciones y modos de falla de los ISED's establecido para la estación de bombeo.

PLANTA:Deshidratacion de crudo AUCA51		
ISED'S	FUNCIONES	MODOS DE FALLA
Valvula control y seguridad	Proteger a las bombas de daños prematuros.	Operación de bomba con sobrecarga - parcial y oculto.
Tubería y accesorios	Conducir el crudo manteniendo su integridad estructural	Corrosión - parcial y oculto
Bomba BOOSTER	Transformar energía eléctrica por medio de un motor eléctrico de 80 HP en energía hidráulica con una presión de descarga de 80 PSI con un caudal constante de 25.000 barriles por día.	No se entrega la potencia nominal - parcial y evidente
		Sobrecarga de bomba - total y evidente
		Cavitación - parcial y oculta
Válvula de control de caudal	Proteger el sobrecaudal de la bomba.	Incremento en la temperatura-total y evidente.
		Perdida de contension en el sello mecánico-total y evidente
Rodamientos	Soportar y permitir la rotación del eje de la bomba con una temperatura del lubricante menor a 120 °F	Temperatura del aceite en rodamientos mayor a 120 °F - parcial y evidente.
Transmisión mecánica	Transmitir la potencia mecánica del motor a la bomba manteniendo las vibraciones controladas.	Alta severidad de vibraciones - parcial y evidente
Bomba de transferencia	Transformar energía eléctrica por medio de un motor eléctrico de 600 HP en energía hidráulica con una presión de descarga de 500 PSI con un caudal constante de 20.000 barriles por día.	No se entrega la potencia nominal - parcial y evidente
		Alta temperatura-total y evidente
		Sobrecarga de bomba - total y evidente
		Cavitación - parcial y oculta
Unidad de potencia hidráulica HPU	Suministrar aceite hidráulico a una presión nominal de 20 20psi a los cojinetes de la bomba.	Baja presión en el aceite hidráulico - parcial y evidente
Sistema de enfriamiento	Enfriar el aceite de lubricación de cojinetes con un sistema de aire por convección (Radiador).	Temperatura del aceite en cojinetes mayor a 120 °F - parcial y evidente.
Cojinetes	Soportar y permitir la rotación del eje de la bomba con una temperatura del lubricante menor a 120 °F	Temperatura del aceite en cojinetes mayor a 120 °F - parcial y evidente.
Motor	Generar potencia mecanica a 480 V 60Hz con una velocidad de 3600 rpm.	Deterioro del aislamiento del estator - total y evidente
		Desgaste de anillos de deslizamiento de escobillas - parcial y evidente
Sistema eléctrico	Energizar, regular y sincronizar equipos.	Puntos calientes, deterioro aislantes - total y oculto
Sistema control	Controlar el funcionamiento del motor-bomba.	Pérdida de control - total y oculto
Sistema protección	Proteger contra cortocircuitos	Sobredimensionamiento de protección eléctrica - total y oculto
Sistema contraincendios	Apagar automáticamente incendios con espuma.	Espuma fuera de fecha de caducidad - total y oculto
Seguridad industrial	Operar e manera segura la unidad de transferencia de crudo.	Problema de seguridad industrial - total y evidente
Miscelaneos	Limpieza, iluminación, pintura	Problemas miscelaneos parcial y evidente

Con los modos de fallas alcanzados anteriormente se procedió a realizar la cadena de causas de falla y soluciones, teniendo como resultado la siguiente tabla:

**Tabla 21.** Cadena de causas de fallas y soluciones para los modos de fallas establecidos para la estación de bombeo AUCA51.

PLANTA: Deshidratación de crudo AUCA51				
MODO DE FALLA:	CAUSA DIRECTA:	DIAGNÓSTICO:	CAUSA DE FALLA:	SOLUCIÓN
Operación de bomba con sobrecarga - parcial y oculto.	Fricción	Medición y análisis de vibraciones.	Desplazamiento axial fuera de parámetros.	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Corrosión - parcial y oculto	Corrosión	Medición y análisis de Ultrasonido	Deterioro de recubrimiento superficial o pintura	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
No se entrega la potencia nominal - parcial y evidente	Cavitación	Medición y análisis de parámetros operativos.	Mal diseño de la altura neta de succión positiva NPSH	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Sobrecarga de bomba - total y evidente	Deformación_plástica_rotura	Inspección y diagnóstico visual.	Holgura mecánica en cojinetes	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Cavitación - parcial y oculta	Cavitación	Medición y análisis de parámetros operativos.	Rango de operación inadecuado	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Incremento en la temperatura total y evidente.	Fricción	Inspección y análisis de lubricantes.	Suciedad y falta de viscosidad o lubricidad del lubricante.	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Pérdida de tensión en el sello mecánico-total y evidente	Fricción	Inspección y análisis de lubricantes.	Suciedad y falta de viscosidad o lubricidad del lubricante.	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Temperatura del aceite en rodamientos mayor a 120 °F - parcial y evidente.	Fricción	Inspección y análisis de lubricantes.	Fugas de lubricante	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Alta severidad de vibraciones - parcial y evidente	Cavitación	Medición y análisis de parámetros operativos.	Rango de operación inadecuado	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
No se entrega la potencia nominal - parcial y evidente	Problemas_eléctricos	Detección y diagnóstico de fallas eléctricas	Protecciones sobredimensionadas	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Alta temperatura-total y evidente	Fricción	Termografía.	Fugas de lubricante	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Baja presión en el aceite hidráulico - parcial y evidente	Deformación_plástica_rotura	Inspección y diagnóstico visual.	Soltura estructural	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Temperatura del aceite en cojinetes mayor a 120 °F - parcial y evidente.	Fricción	Termografía.	Mal diseño de dimensiones y tolerancias en cojinetes	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Deterioro del aislamiento del estator - total y evidente	Problemas_eléctricos	Detección y diagnóstico de fallas eléctricas	Deterioro de recubrimientos aislantes	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Desgaste de anillos de deslizamiento de escobillas - parcial y evidente	Problemas_eléctricos	Detección y diagnóstico de fallas eléctricas	Desgaste de elementos rozantes	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Puntos calientes, deterioro aislantes - total y oculto	Problemas_eléctricos	Termografía.	Puntos calientes por terminales o conexiones flojas	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas
Pérdida de control - total y oculto	Problemas_eléctricos	Detección y diagnóstico de fallas eléctricas	Fallas de los dispositivos de protección	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Sobredimensionamiento de protección eléctrica - total y oculto	Problemas_eléctricos	Detección y diagnóstico de fallas eléctricas	Protecciones sobredimensionadas	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Espuma fuera de fecha de caducidad - total y oculto	Explosiones_incendios	Inspección y diagnóstico visual.	Componentes de protección fuera de su vida útil	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Problema de seguridad industrial total y evidente	Explosiones_incendios	Inspección y diagnóstico visual.	Traba mecánica en elementos de protección	Desmontaje, cambio, montaje, ajustes y pruebas
Problemas misceláneos parcial y evidente	Explosiones_incendios	Inspección y diagnóstico visual.	Suciedad en los componentes de protección	Desmontaje, reparación, montaje, ajustes y pruebas

De este modo, una vez encontrados los modos y causas de falla se obtuvo la siguiente tabla AMFE, utilizando la siguiente ecuación para el cálculo del IPR. (Engineers, SAE JA1011: Evaluation, 2009)

$$IPR = G * F * D$$

**Ecuación 3.1.** Índice de prioridad de riesgo.

**Tabla 22. Cuadro AMFE para la estación de bombeo AUCA51.**

PLANTA: Deshidratación de crudo AUCA51									CORRECTIVOS AMFE			
MODO DE FALLA:	CAUSA DE FALLA:	GRAVEDAD DE FALLA:	G	FRECUENCIA DE FALLA:	F	DETECTABILIDAD:	D	IPR	ACCIONES CORRECTIVAS AMFE:	F	D	IPR
Operación de bomba con sobrecarga - parcial y oculto.	Desplazamiento axial fuera de parámetros.	6 Paros no planificados altos	6	4 Baja	4	4 Moderada con patrones	4	96				0
Corrosión - parcial y oculto	Deterioro de recubrimiento superficial o pintura	6 Paros no planificados altos	6	3 Muy baja	3	4 Moderada con patrones	4	72				0
No se entrega la potencia nominal - parcial y evidente	Mal diseño de la altura neta de succión positiva NPSH	5 Paros no planificados leves	5	4 Baja	4	4 Moderada con patrones	4	80				0
Sobrecarga de bomba - total y evidente	Holgura mecánica en cojinetes	6 Paros no planificados altos	6	7 Moderada alta	6	6 Poco detectable	6	216	Instalación de sensores de desplazamiento axial y temperatura en los cojinetes.	3	3	54
Cavitación - parcial y oculta	Rango de operación inadecuado	5 Paros no planificados leves	5	6 Moderada	6	3 Detectable	3	90				0
Incremento en la temperatura - total y evidente.	Suciedad y falta de viscosidad o lubricidad del lubricante.	6 Paros no planificados altos	6	8 Alta	8	3 Detectable	3	144	Instalación de sensores de temperatura en bombas.	4	3	72
Pérdida de contención en el sello mecánico - total y evidente	Suciedad y falta de viscosidad o lubricidad del lubricante.	7 Violación de normas de higiene o ambientales	7	4 Baja	4	4 Moderada con patrones	4	112	Reemplazar los sellos mecánicos de las Bombas.	3	4	84
Temperatura del aceite en rodamientos mayor a 120 °F - parcial y evidente.	Fugas de lubricante	5 Paros no planificados leves	5	3 Muy baja	3	7 Muy poco detectable	7	105	Instalación de sensor de temperatura en la caja rodamientos de la bomba BOOSTER.	3	3	45
Alta severidad de vibraciones - parcial y evidente	Rango de operación inadecuado	5 Paros no planificados leves	5	4 Baja	4	4 Moderada con patrones	4	80				0
No se entrega la potencia nominal - parcial y evidente	Protecciones sobre-dimensionadas	6 Paros no planificados altos	6	3 Muy baja	3	3 Detectable	3	54				0
Alta temperatura - total y evidente	Fugas de lubricante	5 Paros no planificados leves	5	3 Muy baja	3	7 Muy poco detectable	7	105	Instalación de sensor de temperatura en los cojinetes de la bomba de transferencia.	3	3	45
Baja presión en el aceite hidráulico - parcial y evidente	Soltura estructural	5 Paros no planificados leves	5	3 Muy baja	3	3 Detectable	3	45				0
Temperatura del aceite en cojinetes mayor a 120 °F - parcial y evidente.	Mal diseño de dimensiones y tolerancias en cojinetes	2 Casi ninguna consecuencia	2	2 Casi nunca	2	3 Detectable	3	12				0
Deterioro del aislamiento del estator - total y evidente	Deterioro de recubrimientos aislantes	4 Disminución eficiencia alta	4	4 Baja	4	4 Moderada con patrones	4	64				0
Desgaste de anillos de deslizamiento de escobillas - parcial y evidente	Desgaste de elementos rozantes	4 Disminución eficiencia alta	4	5 Moderada baja	5	3 Detectable	3	60				0
Puntos calientes, deterioro aislantes - total y oculto	Puntos calientes por terminales o conexiones flojas	6 Paros no planificados altos	6	6 Moderada	6	6 Poco detectable	6	216	Implementar mantenimiento preventivo para la termografía de puntos calientes.	3	3	54
Pérdida de control - total y oculto	Fallas de los dispositivos de protección	6 Paros no planificados altos	6	3 Muy baja	3	3 Detectable	3	54				0
Sobredimensionamiento de protección eléctrica - total y oculto	Protecciones sobre-dimensionadas	5 Paros no planificados leves	5	2 Casi nunca	2	3 Detectable	3	30				0
Espuma fuera de fecha de caducidad - total y oculto	Componentes de protección fuera de su vida útil	7 Violación de normas de higiene o ambientales	7	5 Moderada baja	5	6 Poco detectable	6	210	Implementar inspecciones mensuales para verificar fechas de caducidad de la espuma.	5	2	70
Problema de seguridad industrial - total y evidente	Traba mecánica en elementos de protección	8 Peligro seguridad humana leve	8	4 Baja	4	3 Detectable	3	96				0
Problemas misceláneos parcial y evidente	Suciedad en los componentes de protección	8 Peligro seguridad humana leve	8	5 Moderada baja	5	6 Poco detectable	6	240	Implementar inspecciones mensuales para la limpieza de los componentes..	3	2	48

A través de los correctivos AMFE obtenidos, tenemos la tabla del Plan Óptimo de Mantenimiento:

**Tabla 23.** Plan óptimo de Mantenimiento para la estación de bombeo AUCA51.

PLANTA: Deshidratación de crudo AUCA51									
ID. AREA	SOLUCIÓN / CORRECTIVO AMFE:	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA:	TIPO DE TAREA:	ESTRATEGIA DE LA TAREA:	TAREAS ASOCIADAS:	MTTR	MTTF - MTBF	PERSONAL	HERRAMIENTAS MATERIALES REPUESTOS:
1	Instalación de sensores de desplazamiento axial y temperatura en los cojinetes.	Buscar los sensores adecuados para la medición del desplazamiento axial y temperatura.	Específica de Cambio	Acción correctiva AMFE	Desmontar bomba de lubricación, desmontar plato portacojinete axial e instalar sensores, montar plato portacojinete axial y montar bomba de lubricación.	11 horas		Equipo de trabajo 2	Materiales repuestos herramientas 3
2	Instalación de sensores de temperatura en bombas.	Seleccionar los sensores de temperatura adecuados para bombas.	Específica de Cambio	Acción correctiva AMFE	Desmontar brida de cuerpo de bomba, instalar sensores de temperatura.	2 horas		Equipo de trabajo 3	Materiales repuestos herramientas 2
3	Reemplazar los sellos mecánicos de las Bombas.	Buscar el repuesto necesario (sello mecánico de lado acople y lado libre de las bombas)	Correctiva AMFE	Mantenimiento Correctivo	Desacople de acople mecánico, desmontaje de portacojinetes, cojinetes, sello mecánico, reemplazar sello mecánico, montar portacojinetes y acople mecánico.	16 horas	2 años	Equipo de trabajo 3	Materiales repuestos herramientas 4
4	Instalación de sensor de temperatura en la caja rodamientos de la bomba BOOSTER.	Seleccionar sensores de temperatura adecuados para la caja rodamientos de la bomba BOOSTER.	Específica de Cambio	Acción correctiva AMFE	Desmontar tapón de caja de rodamientos, instalar sensores de temperatura.	2 horas		Equipo de trabajo 2	Materiales repuestos herramientas 4
5	Instalación de sensor de temperatura en los cojinetes de la bomba de transferencia.	Encontrar sensores de temperatura adecuados para cojinetes de bomba de transferencia.	Específica de Cambio	Acción correctiva AMFE	Desmontar tapón de carcasa de cojinetes, instalar sensores de temperatura.	2 horas		Equipo de trabajo 2	Materiales repuestos herramientas 4
6	Implementar mantenimiento para la termografía de puntos calientes.	Describir tareas de mantenimiento para realizar la termografía de puntos calientes.	Periódica de Inspección	Mantenimiento Predictivo	Verificar que la cámara termográfica se encuentre calibrada, realizar termografía, analizar resultados de la termografía, emitir informe.	1 hora	3 meses	Equipo de trabajo 2	Materiales repuestos herramientas 2
7	Impletar inspecciones mensuales para verificar fechas de caducidad de la espuma.	Buscar el MSDS de la espuma y describir las tareas para las inspecciones.	Periódica de Inspección	Mantenimiento Preventivo Inspección Diagnóstico	Verificar fecha de elaboración de espuma, constatar fecha de caducidad de espuma, reemplazar espuma.	2 horas	1 mes	Equipo de trabajo 1	Materiales repuestos herramientas 2
8	Implementar inspecciones mensuales para la limpieza de los componentes.	Buscar suministros adecuados para la limpieza de los componentes.	Periódica de Inspección	Mantenimiento Preventivo Inspección Diagnóstico	Desmontar componentes de sistema contra incendio, realizar limpieza e inspección, montar componentes.	2 horas	1 mes	Equipo de trabajo 2	Materiales repuestos herramientas 3

Finalmente obtenido todos estos resultados en la aplicación Excel se procedió a subir el archivo a la plataforma One Drive, en la cual, se pudo guardar el archivo como Google Sheets para que posteriormente mediante la herramienta Google Sites se pueda crear la siguiente página web app:

<https://sites.google.com/view/ticalexispres/p%C3%A1gina-principal>

Vinculo de acceso a editar en Google Sheets:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1LLZrYLWifE8-9FetxTrh0Lirz4KGsQL6bQICwKkFpu0/edit?usp=sharing>

### 3.2. Conclusiones

- La Web App desarrollada permite realizar de forma rápida y sencilla la implementación de la metodología RCM para la estación de bombeo seleccionada.
- El proceso RCM implementado mediante la Web App generó un plan de mantenimiento óptimo para incrementar la confiabilidad y disponibilidad del sistema de bombeo analizado.

- Es posible crear una aplicación Web App a partir de la herramienta Google Sheets, la misma que es capaz de llevar a cabo todo el proceso necesario para aplicar correctamente la metodología RCM para la optimización del mantenimiento de la estación de bombeo AUCA51 de Petroecuador.
- Mediante La utilización de funciones y listas desplegadas independientes en Excel, se puede lograr una mejor organización y procesamiento de datos necesarios para el análisis RCM, ya que nos permite completar de manera rápida los formatos RCM y crear fácilmente la Web App.

### **3.3. Recomendaciones**

- Se recomienda utilizar la Web App a estaciones de bombeo e instalaciones de empresas pequeñas o pymes para optimizar su mantenimiento a bajo costo y de manera rápida.
- Brindar capacitación al personal para el correcto manejo de la Web App.
- Se recomienda definir los ISED's de todos los sistemas que conforma la planta para una mayor optimización de mantenimiento.
- Se recomienda considerar la adición de funciones complementarias, como informes, gráficos y análisis de registros históricos, para enriquecer la aplicación creada.
- En futuras mejoras se sugiere integrar la Web App con sistemas de gestión de mantenimiento y bases de datos internas de la compañía.

## **4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Dacheng Li, J. G. (2010). *"Study and application of reliability-centered maintenance considering radical maintenance," Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (5 ed., Vol. 23).

Engineers, S. o. (2009). *SAE J1739: Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (DesignFMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis*. Warrendale: SAE International.

Engineers, S. o. (2009). *SAE JA1011: Evaluation* (2 ed.). Warrendale: SAE International.

Engineers, S. o. (2011). *SAE JA1012: A Guide to the reliability-centered maintenance (RCM)*.

Warrendale: SAE International.

Mora-Gutiérrez. (2009). *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control*. Alfaomega.

Moubray, J. (1997). *RCM II Reliability-Centred Maintenance* (2 ed.). , New York: : Industrial Press

Inc.