

Desarrollo de un plan de mantenimiento basado en la metodología (RCM) para un sistema de bombeo de agua en la empresa piscícola PROCEAL S.A.

Arias Ramos Luis Fernando, Córdoba Collazos Elkin Leandro

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

Director

Ing. Francisco Saldivia

Magister Gerencia de Mantenimiento

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bogotá D.C.

2025

## **Dedicatoria**

A mis padres, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y por ser mi fundamento en cada paso de este camino. Su esfuerzo y amor han sido mi mayor motivación.

A mi familia, por su paciencia y comprensión durante los momentos de dedicación que este proyecto requirió. Cada uno de ustedes es parte esencial de este logro.

A mis profesores y mentores, por compartir su conocimiento, inspirarme y guiarme en el campo de la Gerencia de Mantenimiento, permitiéndome crecer tanto profesional como personalmente.

Y, especialmente, a Dios por darme la fortaleza, sabiduría y oportunidades para alcanzar esta meta.

Este trabajo es el reflejo de cada uno de ustedes.

## **Agradecimientos**

A la empresa PROCEAL S.A., por su colaboración y apoyo en la realización de este proyecto. A la Universidad Industrial de Santander, por proporcionar un entorno académico adecuado y recursos necesarios para la investigación. A todas estas entidades, expresamos nuestro agradecimiento.

También quiero extender mi gratitud a todos los profesores y mentores que nos guiaron durante el proceso, ofreciéndonos sus valiosas opiniones y consejos. Gracias a los colegas y amigos que brindaron su apoyo moral y sus ánimos constantes. Sin su ayuda y sus palabras de aliento, no hubiera sido posible completar este proyecto con éxito.

## Tabla de Contenido

		<b>Pág.</b>
1.	OBJETIVOS .....	15
1.1	Objetivo General.....	15
1.2	Objetivos Específicos.....	15
2.	MARCO TEÓRICO.....	16
2.1	Antecedentes .....	16
2.1	Marco contextual .....	19
2.2	Teoría de sistemas de bombeo .....	19
2.2.1	Definición: .....	19
2.2.2	Clasificación: .....	19
2.2.3	Balance Energético en Bombas .....	19
2.2.4	Rendimientos: .....	20
2.3	Instalaciones de Bombeo .....	20
2.3.1	Punto de funcionamiento: .....	20
2.3.2	Regulación del punto de funcionamiento: .....	20
2.3.3	Análisis Dimensional y Semejanza Física .....	21
2.3.4	Leyes de semejanza: .....	21
2.4	Mantenimiento de sistemas de bombeo .....	21
2.5	Teoría del mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) .....	23
2.6	Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF/FMECA).....	23
2.7	Contexto operacional: .....	24
2.8	Análisis de criticidad de los equipos.....	25

2.8.1	Método cualitativo .....	25
2.8.2	Método cuantitativo .....	25
3.	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	26
3.1	Funcionamiento de los equipos en la empresa PROCEAL SA .....	26
3.2	Análisis de Criticidad de Equipos en PROCEAL SA: Evaluación y Priorización de Activos Críticos .....	26
3.3	Políticas y procedimientos de mantenimiento en la empresa PROCEAL SA .....	32
3.4	Inspección del sitio de operación al sistema de bombeo .....	33
3.5	Registro fotográfico de visita al lugar de operación del sistema de bombeo.....	35
3.5.1	Contexto operacional: .....	36
3.6	Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) para Establecer un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) .....	37
3.6.1	Valoración del Riesgo.....	37
3.6.2	Severidad.....	37
3.6.3	Ocurrencia de fallos .....	38
3.6.4	Detección de fallos.....	39
3.6.5	Sistema y subsistemas por evaluar.....	40
	Nota: Clasificación de modos y efectos de falla, consecuencia y valoración del riesgo para las válvulas del sistema de bombeo.....	44
4.	PLAN DE MANTENIMIENTO A PARTIR DEL AMEF .....	45
5.	ANALISIS COSTO BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACION DEL PLAN DE MANTENIMIENTO.....	50
5.1	Cálculo de la TIR (Tasa Interna de Retorno).....	55

5.1.1	Cálculo de Payback.....	57
6.	CONCLUSIONES .....	58

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Ponderación de fallos y consecuencias</i> .....	28
Tabla 2 <i>Cálculo de criticidad para los equipos</i> .....	30
Tabla 3 <i>Matriz de criticidad</i> .....	30
Tabla 4 <i>Datos técnicos del equipo crítico</i> .....	31
Tabla 5 <i>Valoración de severidad</i> .....	38
Tabla 6 <i>valoración de ocurrencia de fallos</i> .....	39
Tabla 7 <i>valoración de detección de fallos</i> .....	40
Tabla 8 <i>Taxonomía de sistema y subsistema de equipo crítico</i> .....	40
Tabla 9 <i>Análisis de modos y efectos de fallas – Bomba HIDROMAC ETN 200/315</i> .....	41
Tabla 10 <i>Análisis de modos y efectos de fallas – Motor eléctrico WEG a 1.750 RPM –100 HP</i> 42	
Tabla 11 <i>Análisis de modos y efectos de fallas – Tubería en lámina de 14”</i> .....	43
Tabla 12 <i>Análisis de modos y efectos de fallas – válvulas (1 válvula mariposa 10” y 1 válvula compuerta 10”)</i> .....	44
Tabla 13 <i>Matriz de decisión bomba HIDROMAC ETN 200/315</i> .....	46
Tabla 14 <i>Matriz de decisiones Motor eléctrico WEG de alta eficiencia a 1.750 RPM - 100 HP</i> . 47	
Tabla 15 <i>Matriz de decisiones Tubería en lámina de 14 pulgadas</i> .....	48
Tabla 16 <i>Matriz de decisiones válvulas (1 válvula mariposa 10” y 1 válvula compuerta 10”)</i> . 49	
Tabla 17 <i>Inversión Inicial para Implementar RCM</i> .....	51
Tabla 18 <i>Tabla anual de costos de mantenimiento tradicional vs RCM</i> .....	53
Tabla 19 <i>Flujo de Caja Proyectado (5 años)</i> .....	56

Tabla 20 *Comparación con Otras Tasas* ..... 57

Tabla 21 *Cálculo del payback con tasa del 15%*: ..... 58

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Disposición cabeza de descarga .....	35
Figura 2 Acople bomba-motor eléctrico. ....	35
Figura 3 Placa de motor eléctrico. ....	36

## Glosario

**Análisis de criticidad:** proceso para determinar la importancia de un equipo dentro de un sistema, basado en su impacto en la operación y en la seguridad.

**Confiabilidad:** probabilidad de que un equipo o sistema funcione sin fallas durante un período determinado y en condiciones específicas.

**Disponibilidad:** medida de qué tan frecuentemente un sistema o equipo está operable cuando se necesita.

**Estrategia de mantenimiento:** conjunto de diseños para mantener el equipo en óptimas condiciones y prevenir fallos.

**Falla funcional:** incapacidad de un equipo para cumplir su función requerida dentro de un sistema.

**Falla potencial:** indicador o condición que advierte de una posible falla antes de que ocurra completamente.

**Modos de falla:** formas en las que un equipo puede fallar, como desgaste, fatiga o corrosión.

**Mantenimiento correctivo:** actividad de reparación que se realiza después de que una falla haya ocurrido.

**Mantenimiento predictivo:** estrategia basada en la monitorización de parámetros operativos para anticipar fallas.

**Mantenimiento preventivo:** actividades programadas para reducir la probabilidad de fallas.

**Sistema de bombeo:** conjunto de equipos diseñados para mover fluidos de un punto a otro, generalmente compuestos por bombas, tuberías, válvulas y motores.

**Vida útil:** tiempo estimado durante el cual un equipo puede operar de manera confiable antes de requerir reemplazo o reparación importante

## Resumen

**Título:** Desarrollo de un plan de mantenimiento basado en la metodología (RCM) para un sistema de bombeo de agua en la empresa piscícola PROCEAL S.A

**Autor:** Luis Fernando Arias Ramos, Elkin Leandro Córdoba Collazos.

**Palabras Clave:** Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), Sistema de bombeo,

Modos de falla, Disponibilidad, Estrategia de mantenimiento, Análisis de criticidad,

Confiabilidad operativa

**Descripción:** Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un Plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para un sistema de bombeo, con el fin de optimizar su operación, reducir costos de mantenimiento y mejorar la disponibilidad del equipo. Actualmente, los sistemas de bombeo desempeñan un papel fundamental en diversas industrias, garantizando el transporte eficiente de fluidos en procesos productivos. Sin embargo, las fallas recurrentes generan paradas no programadas, costos elevados de reparación y pérdidas económicas significativas.

El análisis RCM identifica los modos de falla, evalúa su impacto en la operación y define estrategias de mantenimiento adecuadas, ya sean preventivas, predictivas o correctivas. Para ello, se emplea una metodología basada en la recopilación de datos históricos, análisis de criticidad y clasificación de fallas, con el fin de determinar las acciones óptimas para cada componente del sistema de bombeo.

Este estudio incluye la identificación de fallas funcionales, análisis de causa raíz y el diseño de un plan de mantenimiento que minimice los riesgos y mejore la confiabilidad operativa. Además, se establecen indicadores clave de desempeño (KPI) para evaluar la efectividad del mantenimiento implementado.

Finalmente, la aplicación de RCM en el sistema de bombeo maximiza la eficiencia del equipo, prolonga su vida útil y garantiza la continuidad del servicio, contribuyendo a la sostenibilidad operativa y económica de la empresa.

## Abstract

**Title:** Development of a maintenance plan based on the methodology (RCM) for a water pumping system at the fish farming company PROCEAL S.A.

**Author:** Luis Fernando Arias Ramos, Elkin Leandro Córdoba Collazos.

**Keywords:** Reliability-Centered Maintenance (RCM), Pumping system, Failure modes, Availability, Maintenance strategy, Criticality analysis, Operational reliability

**Description:** This work aims to develop a Reliability-Centered Maintenance (RCM) Plan for a pumping system, aiming to optimize its operation, reduce maintenance costs, and improve equipment availability. Currently, pumping systems play a fundamental role in various industries, ensuring the efficient transport of fluids in production processes. However, recurring failures generate unscheduled downtime, high repair costs, and significant economic losses.

RCM analysis identifies failure modes, assesses their impact on operations, and defines appropriate maintenance strategies—whether preventive, predictive, or corrective. To achieve this, a methodology based on historical data collection, criticality analysis, and failure classification is used to determine the optimal actions for each component of the pumping system.

This study includes the identification of functional failures, root cause analysis, and the design of a maintenance plan that minimizes risks and improves operational reliability. In addition, key performance indicators (KPIs) are established to evaluate the effectiveness of the implemented maintenance.

Finally, the application of RCM to the pumping system maximizes equipment efficiency, extends its useful life, and ensures service continuity, contributing to the company's operational and economic sustainability.

## INTRODUCCIÓN

La empresa Proceal S.A. es la principal productora de Tilapia tipo exportación en el departamento del Huila. Su proceso de producción se basa en estanques en tierra y jaulones en la represa de Betania. La finca El Acuario está situada en el municipio de Aipe, en la zona norte del departamento del Huila. En esta finca se cultiva tilapia de la especie niloticus, alcanzando una producción anual de 120 toneladas. La finca cuenta con 19 estanques en tierra, los cuales son abastecidos de agua mediante un sistema de bombeo que extrae agua del río Bache. Esta actividad es esencial para la operación, ya que los cultivos acuícolas requieren un buen flujo y oxigenación del agua para cumplir con los estándares de calidad necesarios para la exportación del producto.

Dado que el sistema de bombeo es crucial para la operación, el objetivo principal de este proyecto es implementar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para el sistema de bombeo de la finca El Acuario, cumpliendo con los requisitos técnicos y las condiciones legales para el uso del agua. Implementar este plan es esencial para mejorar la confiabilidad del sistema, optimizar los costos de mantenimiento y garantizar la calidad del suministro de agua, asegurando así un funcionamiento continuo y eficiente.

## JUSTIFICACIÓN

El sistema de bombeo de agua es el corazón de una finca productora piscícola. Sin un suministro constante y confiable de agua, toda la operación está en riesgo, desde la salud y crecimiento de los peces hasta la rentabilidad económica de la finca. Actualmente, los métodos tradicionales de mantenimiento pueden ser reactivos y poco efectivos, lo que lleva a fallas inesperadas, tiempos de inactividad prolongados y costos elevados de reparación. Las interrupciones en el suministro de agua pueden tener consecuencias devastadoras, como la pérdida de stock, reducción en la calidad del agua, y un impacto directo en la producción.

Implementar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad aborda estos problemas al priorizar la identificación y mitigación de posibles fallas antes de que ocurran. Este enfoque proactivo no solo reduce el riesgo de fallas catastróficas, sino que también optimiza el uso de recursos, asegurando que los repuestos críticos estén disponibles y que el personal esté preparado para intervenir eficientemente cuando sea necesario.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo General**

Desarrollar un plan de mantenimiento basado en la metodología (RCM) para un sistema de bombeo en la empresa piscícola PROCEAL S.A.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Realizar un diagnóstico del sistemas y subsistemas del equipo de bombeo conformado por el motor eléctrico de 100 hp marca WEG de alta eficiencia a 1.750, acoplado a bomba ETN 200/315 y sus accesorios de succión y descarga.
- Determinar modos y efectos de falla por medio de un AMEF para desarrollar tareas y rutinas de mantenimiento del sistema de bombeo.
- Realizar un análisis costo-beneficio del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para asegurar que las estrategias implementadas sean económicamente viables.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

El mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) ha sido ampliamente adoptado en industrias que requieren alta disponibilidad y eficiencia operativa de sus equipos. En el caso de los sistemas de bombeo, diversas organizaciones han implementado esta metodología para reducir costos, mejorar la confiabilidad y optimizar la planificación del mantenimiento. Estudios previos han demostrado que la aplicación de RCM permite identificar modos de falla críticos y definir estrategias de mantenimiento más efectivas que los enfoques tradicionales, los cuales suelen ser correctivos o preventivos basados en tiempos fijos. En sectores como el industrial, el petrolero y el de tratamiento de agua, la implementación de RCM ha resultado en una reducción significativa de fallas imprevistas y en una mejor gestión de recursos. No obstante, su aplicación requiere un análisis detallado del equipo, de sus condiciones operativas y del impacto de las fallas en la producción, lo que ha llevado a la necesidad de adaptar la metodología según las particularidades de cada sistema (Quintero, 2021)

En el estudio, titulado *"Plan de Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM) para los Equipos de Tipo Rotativo del Proceso 'Sistema de Tratamiento y Aprovechamiento de Agua de Producción (STAP 6)' en la Planta 'Estación Castilla 3 (EC3)' de la Empresa Ecopetrol S.A."*, que fue desarrollado por Héctor Omar Silva Rangel con el objetivo principal de diseñar un plan de mantenimiento basado en confiabilidad para los equipos rotativos del sistema STAP6 en la planta EC3 de Ecopetrol. El trabajo buscó garantizar la disponibilidad operativa, mitigar riesgos de

seguridad y ambientales, y optimizar los costos asociados a fallos mediante la implementación de metodologías estructuradas.

La metodología empleada combinó el enfoque RCM con herramientas como la taxonomía de equipos (ISO 14224) para clasificar los 81 equipos rotativos, el análisis FMEA para identificar y priorizar 18 modos de falla recurrentes (como obstrucciones, fugas y desgastes), y una matriz de criticidad para evaluar riesgos operativos, económicos y ambientales. A partir de estos análisis, se definieron estrategias de mantenimiento adaptadas, destacándose el mantenimiento predictivo (monitoreo de vibraciones y termografía), las inspecciones preventivas y la participación activa de operadores en rondas de detección temprana.

Los resultados demostraron una reducción del 80% en el nivel de riesgo de los equipos (pasando de "Medio" a "Bajo") y un ahorro económico significativo, como en el caso del decantador centrífugo, cuyos costos potenciales por fallos disminuyeron de USD 63,670 a USD8,397 anuales, validando la eficiencia del plan. Se concluyó que la implementación del RCM no solo mejoró la confiabilidad de los activos, sino que también evidenció la importancia del mantenimiento predictivo y la capacitación operativa para prevenir fallas críticas. El decantador centrífugo emergió como el equipo más crítico debido a sus altos costos de reparación, reforzando la necesidad de estrategias específicas para equipos de alto impacto. Este trabajo aporta un modelo replicable para la gestión de mantenimiento en contextos industriales similares. (Rangel, 2021)

El documento titulado *"Propuesta de Implementación de RCM en Sistema de Separación y Reinyección de Agua en una Central Geotérmica de El Salvador"*, elaborado por Oscar Rafael

Figuerola Cobar, José Alberto Flores Soto y Jaime Miguel Vargas Miranda en 2020, presenta un estudio detallado sobre la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en una central geotérmica. El objetivo principal es optimizar el sistema de reinyección de agua, clave para la sostenibilidad del reservorio geotérmico, mediante un enfoque estructurado que incluye la identificación de equipos críticos, el análisis de modos de falla y la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y preventivo.

La metodología empleada combinó investigación de campo, análisis de criticidad y AMFEC (Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Consecuencias), lo que permitió identificar las cuatro bombas centrífugas del sistema como los equipos más críticos (0.58% del total evaluado). Estas bombas, esenciales para garantizar el flujo continuo de agua geotérmica, fueron el foco del plan RCM, que se dividió en mantenimiento predictivo (análisis de vibraciones, ultrasonido), preventivo (inspecciones programadas) y acciones de rediseño/mejora (capacitación del personal y auditorías a proveedores). Los resultados demostraron que la implementación del RCM reduciría los costos anuales de mantenimiento en un 27.8%, pasando de 560,999 a 404,911, con ahorros estimados de \$147,462.54. Además, se proyectó una mejora del 5% en la eficiencia energética y una significativa reducción del riesgo operacional, evitando fallas catastróficas con potenciales costos millonarios.

En conclusión, el estudio evidencia que el RCM no solo optimiza los recursos y prolonga la vida útil de los equipos, sino que también fortalece la confiabilidad del sistema de reinyección. Las recomendaciones incluyen implementar el plan de manera gradual, capacitar al personal técnico y expandir el enfoque RCM a otros sistemas de la central. Este trabajo destaca la

importancia de estrategias de mantenimiento proactivas en la industria geotérmica, alineadas con estándares de sostenibilidad y eficiencia operativa (Figuroa Cobar et al., 2020)

## 2.1 Marco contextual

### 2.2 Teoría de sistemas de bombeo

#### 2.2.1 *Definición:*

Las bombas son máquinas generadoras que comunican energía mecánica a un fluido incompresible (líquidos o gases con cambios de densidad despreciables). (Zamora Parra & Viedma Robles, 2016)

#### 2.2.2 *Clasificación:*

Turbomáquinas (rotodinámicas): Intercambian energía mediante un rodete giratorio (ejemplo: bombas centrífugas, axiales o mixtas).

Máquinas de desplazamiento positivo: Intercambian energía mediante cámaras de trabajo alternativas o rotativas (ejemplo: bombas de émbolo, de engranajes). (Zamora Parra & Viedma Robles, 2016)

#### 2.2.3 *Balance Energético en Bombas*

- Ecuación de conservación de la energía mecánica:

$$E_s - E_e = WG - \Phi vG, E_s - E_e = GW - G\Phi v, \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

- $EE$ : Energía mecánica específica (presión, cinética y potencial).

- $WW$ : Potencia útil suministrada por la bomba.
- $\Phi_v\Phi_v$ : Potencia perdida por disipación viscosa.

#### **2.2.4 Rendimientos:**

- Hidráulico ( $\eta_{hh}$ ): Relación entre la energía útil y la energía suministrada.
- Volumétrico ( $\eta_{vv}$ ): Relación entre el caudal útil y el caudal total (incluye fugas).
- Orgánico ( $\eta_{oo}$ ): Relación entre la potencia interna y la potencia suministrada al eje.
- Total ( $\eta_t = \eta_{hh}\eta_{vv}\eta_{oo} = \eta_{hh}\eta_{vv}$ ).

### **2.3 Instalaciones de Bombeo**

#### **2.3.1 Punto de funcionamiento:**

Intersección entre la curva característica de la bomba ( $H_m = f(Q)$ ) y la curva resistente de la instalación ( $H_{inst} = H_g + \Delta H_{inst}$ ).

- $H_g$ : Altura geométrica (diferencia de cotas).
- $\Delta H_{inst}$ : Pérdidas por fricción y accesorios, calculadas con la ecuación de Darcy-Weisbach: (Zamora Parra & Viedma Robles, 2016)

$$\Delta H_{inst} = (\lambda L D + \sum K_i) \frac{v^2}{2g}$$

#### **2.3.2 Regulación del punto de funcionamiento:**

- Estrangulamiento: Variar la resistencia de la instalación (ejemplo: cerrar una válvula).

- Variación de velocidad de giro: Ajustar la curva característica de la bomba.
- Acoplamiento de bombas:
  - En serie: Aumenta la altura manométrica total ( $HT = H1 + H2$ ).
  - En paralelo: Aumenta el caudal total ( $QT = Q1 + Q2$ ).

### 2.3.3 Análisis Dimensional y Semejanza Física

- Coeficiente de caudal:  $q = Q/\Omega D^3$
- Coeficiente de altura:  $\psi = gH/\Omega^2 D^2$
- Velocidad específica ( $\Omega_s$ ): Caracteriza el diseño de la bomba:

$$\Omega_s = \frac{\Omega Q^{1/2}}{(gH_m)^{3/4}} \Big|_{\eta_{\max}} \quad \text{Ecuación 2}$$

### 2.3.4 Leyes de semejanza:

Permiten predecir el comportamiento de bombas geoméricamente semejantes:

$$\frac{Q_1}{\Omega_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{\Omega_2 D_2^3}, \quad \frac{H_1}{\Omega_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{\Omega_2^2 D_2^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

## 2.4 Mantenimiento de sistemas de bombeo

El mantenimiento de sistemas de bombeo es fundamental para garantizar su eficiencia, durabilidad y correcto funcionamiento. Comienza con una selección adecuada de la bomba,

considerando factores como el tipo de fluido, caudal, condiciones de succión y descarga, así como el NPSH (Carga de Succión Positiva Neta) para evitar problemas como la cavitación, un fenómeno dañino causado por la formación de burbujas de vapor debido a bajas presiones. Las bombas se clasifican en gravimétricas, de desplazamiento positivo y dinámicas (centrífugas), cada una con características específicas que influyen en su mantenimiento.

Un aspecto clave es la lubricación de cojinetes, que debe realizarse periódicamente con grasas o aceites recomendados, como Texaco Premium RB No. 2 o Shell Alvania No. 2, ajustando la frecuencia según las condiciones de operación. Los sellos mecánicos y empaquetaduras requieren atención especial: los primeros deben instalarse con precisión para evitar fugas, mientras que las segundas necesitan un ajuste que permita un goteo controlado y su reemplazo cada 2-3 meses en uso continuo. La inspección de componentes como anillos de desgaste, rodets y ejes es esencial para detectar holguras excesivas, desgaste o desbalanceo, que pueden afectar el rendimiento.

Entre las fallas más comunes destacan la cavitación, vibraciones por desalineación, fugas en sellos y sobrecalentamiento por lubricación inadecuada. Para diagnosticarlas, se utilizan tablas de referencia que relacionan síntomas con causas posibles, como obstrucciones, velocidad incorrecta o problemas en la instalación. Una correcta alineación entre la bomba y el motor, junto con un cebado adecuado para eliminar aire del sistema, son prácticas esenciales para prevenir fallas. En resumen, un mantenimiento sistemático, basado en inspecciones periódicas y la corrección oportuna de problemas, es la clave para maximizar la eficiencia y vida útil de los sistemas de bombeo. (Rodríguez, s. f.)

## **2.5 Teoría del mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)**

El RCM es una metodología sistemática que busca optimizar las estrategias de mantenimiento mediante el análisis de funciones, fallas y sus consecuencias en equipos industriales. Según el documento, se basa en normas internacionales como SAE JA 1011 y evalúa críticamente cada componente para determinar si requiere mantenimiento preventivo, predictivo o correctivo, priorizando acciones según su impacto en la operación. Su implementación permite reducir fallas críticas, extender la vida útil de los activos y optimizar costos mediante decisiones basadas en datos de confiabilidad.

El proceso del RCM incluye siete preguntas clave que analizan desde las funciones del equipo hasta las consecuencias de sus fallas, integrando herramientas como el RCM Scorecard para medir efectividad. El documento destaca su enfoque en mantenimiento proactivo, donde técnicas como el análisis Weibull ayudan a predecir comportamientos de falla. Al centrarse en componentes críticos, el RCM mejora la disponibilidad operacional mientras minimiza intervenciones innecesarias, alineando el mantenimiento con los objetivos estratégicos de la organización. (*Mantenimiento estratégico*, s. f.)

## **2.6 Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF/FMECA)**

El AMEF es una herramienta analítica que identifica y evalúa sistemáticamente los modos de falla potenciales, sus causas y efectos en sistemas industriales. El documento explica que asigna un Número de Prioridad de Riesgo (RPN) mediante tres parámetros: severidad, frecuencia de

ocurrencia y capacidad de detección, permitiendo priorizar acciones correctivas. Esta metodología es fundamental para el mantenimiento predictivo y preventivo, ya que anticipa fallas antes de que ocurran, especialmente en componentes críticos.

El AMEF se aplica tanto en diseño como en operación, integrando técnicas como árboles de fallas y matrices de criticidad para evaluar riesgos técnicos. Según el documento, su estrecha relación con el RCM permite desarrollar estrategias de mantenimiento más efectivas, donde los datos del AMEF alimentan el análisis de confiabilidad. Al documentar lecciones aprendidas y optimizar procesos, el AMEF reduce costos operativos y mejora la seguridad, siendo clave para sistemas complejos donde las fallas tienen impactos significativos. (*Mantenimiento estratégico*, s. f.)

### **2.7 Contexto operacional:**

Refiere a las condiciones bajo las cuales un activo o sistema opera, incluyendo factores como el entorno físico, la carga de trabajo, las condiciones ambientales y los requisitos de desempeño. Comprender el contexto operacional es fundamental para aplicar metodologías como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), ya que permite identificar los modos de falla más relevantes y diseñar estrategias de mantenimiento efectivas (Moubray, 1997)

En términos prácticos, el contexto operacional abarca aspectos como la frecuencia de uso, temperaturas de operación, presencia de contaminantes, variabilidad de carga y condiciones de mantenimiento previas. Evaluarlo correctamente ayuda a definir las mejores prácticas de mantenimiento y evitar fallas prematuras (Moubray, 1997)

## **2.8 Análisis de criticidad de los equipos**

El análisis de criticidad es una herramienta fundamental en la gerencia de mantenimiento, ya que permite priorizar equipos, sistemas o componentes según su impacto en la seguridad, operatividad, costos y calidad de los procesos. Mediante criterios como frecuencia de fallas, consecuencias operacionales, disponibilidad de repuestos y costos de reparación, se clasifican los activos en niveles de criticidad (alta, media o baja). Esto optimiza la asignación de recursos, asegurando que el mantenimiento preventivo y predictivo se enfoque en los equipos más relevantes para minimizar riesgos y maximizar la confiabilidad. Un análisis bien ejecutado no solo reduce paradas no planificadas, sino que también contribuye a la sostenibilidad y rentabilidad de la organización. (Moubray, 1997)

El análisis de criticidad se puede realizar mediante diversas metodologías, dependiendo del nivel de detalle requerido y la información disponible. Algunas de las más utilizadas son:

### ***2.8.1 Método cualitativo***

Clasifica los equipos según criterios como seguridad, impacto en la producción y costos de falla. Se representa en una matriz de criticidad con niveles de riesgo (bajo, medio, alto) (Campos-López et al., 2019)

### ***2.8.2 Método cuantitativo***

Asigna valores numéricos a criterios como frecuencia de falla, impacto económico y seguridad. Se calcula un índice de criticidad sumando o ponderando los valores asignados (Campos-López et al., 2019)

### **3. ANÁLISIS Y RESULTADOS**

#### **3.1 Funcionamiento de los equipos en la empresa PROCEAL SA**

En la empresa PROCEAL SA, los equipos esenciales incluyen sistemas de bombeo para mantener los niveles de agua en los estanques en tierra, aireadores para el oxigenar el agua, plantas eléctricas para el suministro de energía, maquinaria amarilla para el mantenimiento de los estanques y camiones de pesca para transportar los peces a la planta de procesamiento. Estos equipos aseguran un ambiente óptimo para producir tilapia, el principal producto de la empresa.

Aunque todos los equipos mencionados previamente cumplen funciones importantes en la empresa, es necesario identificar aquellos que requieren mayor atención y asegurar un mantenimiento adecuado. Por esta razón, se debe aplicar un análisis de criticidad para determinar el equipo crítico dentro de la operación y aplicar estrategias de mantenimiento que aseguren su funcionamiento óptimo.

#### **3.2 Análisis de Criticidad de Equipos en PROCEAL SA: Evaluación y Priorización de Activos Críticos**

Se lleva a cabo un análisis de criticidad para cinco equipos utilizados diariamente en la operación de PROCEAL SA, con el propósito de determinar la criticidad de cada activo. Se utilizó el método de análisis de criticidad semi cuantitativo para esta evaluación.

El análisis de criticidad semi cuantitativo comienza identificando todos los equipos involucrados en la operación y evaluando la frecuencia de fallas basada en datos históricos y experiencia, utilizando una escala de 1 a 5. Luego, se evalúan las consecuencias de las fallas considerando el impacto en la seguridad, la operación y los costos de reparación, también utilizando una escala de 1 a 5. Con estas evaluaciones, se calcula la criticidad de cada equipo mediante la fórmula Criticidad, asignando ponderaciones según la importancia relativa. Finalmente, se jerarquizan los equipos según su nivel de criticidad para identificar el equipo más crítico, permitiendo enfocar los recursos y esfuerzos de mantenimiento en los equipos que tienen el mayor impacto en la operación y la seguridad.

Fórmula para el cálculo de consecuencia:

$$FC = (IO * FO) + CM + IMA + IS \quad \text{Ecuación 4}$$

FC = Consecuencia

IO = Impacto Operacional

FO = Flexibilidad

CM = Costo de Mantto

IMA = Impacto Ambiental

IS = Impacto HSE

Fórmula para el cálculo de criticidad:

$$C = FC * FF \quad \text{Ecuación 5}$$

C = Criticidad, FC = Consecuencia, FF = Frecuencia de Falla.

Después de definir la metodología, se elabora la tabla de ponderación de factores de

frecuencia y consecuencia, y se seleccionan los equipos de la empresa para el análisis de criticidad.

La Tabla de ponderación de fallos y consecuencias es una herramienta utilizada en mantenimiento para priorizar fallos según su criticidad, evaluando factores como frecuencia, impacto en seguridad, costos y disponibilidad operativa. Asigna puntuaciones a cada aspecto, permitiendo identificar qué fallos requieren acciones inmediatas y cuáles pueden gestionarse a largo plazo, optimizando así recursos y reduciendo riesgos.

**Tabla 1**

*Ponderación de fallos y consecuencias*

<b>Tabla ponderación - Factores de Frecuencia y Consecuencias</b>	
<b>FACTOR DE FRECUENCIA (FF)</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Ponderación</b>
Frecuente, Más de 50 fallas al año	5
Probable, 30 a 50 fallas al año	4
Posible, 20 a 30 fallas al año	3
Improbable, 20 fallas en 2 años	2
Sumamente improbable, menos de 10 fallas en 2 años	1
<b>FACTORES DE CONSECUENCIAS</b>	
<b>Impacto operacional (IO)</b>	<b>Ponderación</b>
Pérdidas mayores 75% producción mes	5
Pérdidas 50% a 74% producción mes	4
Pérdidas 25% a 49% producción mes	3
Pérdidas 10% a 24% producción mes	2
Pérdidas inferiores 10% producción mes	1
<b>Factor flexibilidad operacional (FO)</b>	
No existe stock, tiempos reparación altos	5
Stock parcial, procedimiento reparación complejo	4
Stock parcial, procedimiento reparación sencillo	3
Stock suficiente, procedimiento reparación complejo	2
Stock suficiente, tiempos reparación bajos	1
<b>Costos de mantenimiento (CM)</b>	
Costos materiales superiores a \$20.000.000	5
Costos materiales superiores a \$10.000.000-\$20.000.000	4
Costos materiales superiores a \$5.000.000-\$10.000.000	3
Costos materiales superiores a \$2.000.000-\$5.000.000	2
Costos materiales inferiores a \$2.000.000	1

**Tabla 1***Ponderación de fallos y consecuencias (Continuación)*

<b>Tabla ponderación - Factores de Frecuencia y Consecuencias</b>	
<b>Impacto medio ambiente (IMA)</b>	
Daños irreversibles en el ambiente	5
Daños severos al ambiente	4
Daños medios al ambiente	3
Daños mínimos al ambiente	2
Sin daño ambiental	1
<b>Impacto seguridad (IS)</b>	
Muerte o incapacidad	5
Incapacidad parcial o permanente	4
Daños o enfermedades severas	3
Daños leves en personas	2
Sin impacto en la seguridad	1

(SAE, 2002)

Nota: Tabla de ponderación de fallos y consecuencias ajustados a los datos de la empresa PROCEAL S.A.

La Tabla de cálculo de criticidad es una herramienta usada en mantenimiento para clasificar equipos según su importancia operativa. Evalúa factores como frecuencia de fallos, impacto en producción, seguridad y coste de reparación, asignando una puntuación a cada uno. Esto permite priorizar recursos y acciones de mantenimiento, enfocándose en los equipos más críticos para garantizar la continuidad operativa y reducir riesgos.

La tabla matriz de criticidad es una herramienta estratégica en gestión de mantenimiento que combina la probabilidad de fallo de un equipo con su impacto operacional, representando gráficamente su nivel de riesgo. Clasifica los equipos en cuadrantes según su criticidad, permitiendo priorizar intervenciones en aquellos con mayor riesgo para la producción, seguridad

o costos. Su uso optimiza recursos al dirigir acciones preventivas y predictivas hacia los activos más críticos, mejorando la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas.

**Tabla 2**

*Cálculo de criticidad para los equipos.*

Tabla de ponderaciones y cálculo de criticidad					
Cálculo de la consecuencia					
FACTORES DE CONSECUCENCIA (FC)	EQUIPOS				
	Sistema de bombeo	Camiones de pesca	Plantas eléctricas	Maquinari a amarilla	Airea dores
Impacto Operacional (IO)	4	3	2	2	3
Flexibilidad (FO)	4	2	3	4	4
Costo de Mantto (CM)	3	1	1	3	2
Impacto Ambiental (IMA)	3	1	1	2	1
Impacto HSE (IS)	3	1	2	2	2
Consecuencia	25	9	10	15	7
<b>FC = ((IO*FO) +CM+IMA+IS)</b>					
Cálculo de la Criticidad:					
Frecuencia de falla (FF)	4	1	2	2	1
Criticidad = (FF*FC)	100	9	20	30	7

Nota: La tabla presenta la ponderación de factores de consecuencia (FC) y el cálculo de criticidad para los equipos.

**Tabla 3**

*Matriz de criticidad*

Matriz de criticidad																										
FRECUENCIA (FF)	5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
	4	4	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80	84	88	92	96
3	3	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72	75
2	2	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
	CONSECUENCIAS (CO)																									

Nota: Ubicación de equipos críticos dentro de la matriz de criticidad.

Rango de valores para establecer un equipo crítico

Crítico.  $50 \leq CT \leq 125$  / Semi crítico.  $30 \leq CT \leq 49$  / No crítico.  $5 \leq CT \leq 29$

El cálculo de criticidad para los equipos de PROCEAL SA identifica al sistema de bombeo con una criticidad de 100 dentro de la matriz de criticidad, ubicándolo como el más crítico de la empresa. La evaluación de criticidad se realiza mediante un análisis detallado que considera factores como la frecuencia de fallos, el impacto en la producción, los costos de reparación y el tiempo de inactividad asociado. Un sistema de bombeo con una criticidad de 100 indica que este equipo es esencial para las operaciones continuas de la empresa y que su fallo podría resultar en significativas pérdidas operativas y económicas. Además, la alta criticidad sugiere la necesidad de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo robustas, así como de monitoreo continuo para asegurar su disponibilidad y funcionalidad óptima.

**Tabla 4**

*Datos técnicos del equipo crítico.*

<b>Equipo critico</b>	
<b>Datos generales equipo</b>	
<b>Equipo</b>	Sistema de bombeo de agua
<b>Motor</b>	WEG de alta eficiencia a 1.750 RPM - 100 HP
<b>Bomba</b>	HIDROMAC ETN 200/315
<b>Tubería</b>	Tubo en lámina de 14"
<b>válvulas</b>	1 válvula mariposa 10" y 1 válvula compuerta 10"
<b>Proveedor</b>	HIDRAULICAS DEL SUR S.A.S.

**Tabla 4**

*Datos técnicos del equipo crítico. (Continuación)*

<b>Equipo crítico</b>	
<b>Valor del equipo montaje (\$)</b>	\$ 135.794.470
<b>Año de fabricación</b>	2024
<b>Caudal</b>	200 LPS – 3.170 GPM
<b>Función: bombear agua de una fuente hídrica hacia los estanques en tierra para el cultivo de tilapia, asegurando que se cumplan las necesidades de presión y caudal requeridas en el proceso.</b>	

Nota: Tabla de equipo crítico en la cual se define su función y los datos técnicos.

Una vez definido el equipo crítico se procede a realizar el diagnóstico del sistema, sus parámetros de funcionamiento y los datos de mantenimiento realizados.

### **3.3 Políticas y procedimientos de mantenimiento en la empresa PROCEAL SA**

En primera instancia, se requirió toda la información relevante a PROCEAL SA con el fin de realizar el análisis de los respectivos formatos y acciones desarrolladas en la empresa. En la hoja de vida de cada máquina se registran todas las inspecciones y modificaciones efectuadas desde su puesta en funcionamiento, lo cual es fundamental para mantener un control y un registro detallado de cada elemento operativo de la organización. De la información solicitada a PROCEAL SA, se reporta que no se realizaron registros de los mantenimientos ejecutados en las máquinas y que no existen órdenes de trabajo para las acciones de mantenimiento llevadas a cabo.

En las políticas de mantenimiento de la empresa se ha observado que, aunque existen ciertos ítems relacionados con el programa de mantenimiento, este no es lo suficientemente claro y no define de manera precisa las responsabilidades de los trabajadores.

En cuanto a mantenimiento preventivo establecen los siguientes ítems:

- Realizar inspecciones periódicas de todos los equipos y maquinaria para identificar posibles fallos antes de que ocurran.
- Establecer un calendario de mantenimiento preventivo para cada equipo, detallando las tareas a realizar y la frecuencia.
- Mantener un registro detallado de todas las actividades de mantenimiento preventivo realizadas.

Mantenimiento Correctivo:

- Detectar y diagnosticar fallos en los equipos y maquinaria.
- Desarrollar un plan de acción para la reparación de los fallos identificados.
- Realizar las reparaciones necesarias de manera eficiente y segura.
- Evaluar el funcionamiento del equipo después de la reparación para asegurar que el problema se ha solucionado.

### **3.4 Inspección del sitio de operación al sistema de bombeo**

Durante el diagnóstico inicial del sistema de bombeo compuesto por un motor eléctrico de 100 hp marca WEG, la bomba ETN 200/315 y sus accesorios de succión y descarga, se llevó a cabo una inspección física detallada en su lugar de operación. Se realizó una inspección visual, mediciones de parámetros operativos y una revisión exhaustiva del historial de mantenimiento.

A lo largo de dicha evaluación, se constató la inexistencia de un programa de mantenimiento formalmente establecido para este equipo. La falta de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo quedó evidenciada por la desorganización en los registros de mantenimiento, así como la ausencia de inspecciones periódicas, tareas de mantenimiento programadas y documentación de intervenciones anteriores. Esta situación pone de relieve la necesidad urgente de desarrollar e implementar un programa de mantenimiento estructurado que garantice la operación continua y eficiente del sistema de bombeo.

En el historial de mantenimiento se encontraron facturas correspondientes a los servicios realizados, así como algunos reportes elaborados por los operadores. Estos datos fueron organizados en una hoja de cálculo Excel para mantener un registro ordenado de los mantenimientos realizados al equipo.

La identificación de esta carencia es un paso crucial para mejorar la confiabilidad y el rendimiento del equipo, subrayando la importancia de establecer procedimientos de mantenimiento que aborden las necesidades específicas del sistema. Basado en estos hallazgos, se recomienda proceder con la creación de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad) con el fin de optimizar el funcionamiento y prolongar la vida útil del equipo.

### 3.5 Registro fotográfico de visita al lugar de operación del sistema de bombeo.

**Figura 1**

*Disposición cabeza de descarga*



Nota: Disposición de bomba, válvulas y tubería de la cabeza de descarga del sistema de bombeo.

**Figura 2**

*Acople bomba-motor eléctrico.*



Nota: Disposición de la bomba y motor eléctrico en el sistema de bombeo.

**Figura 3**

*Placa de motor eléctrico.*



Nota: Placa de motor eléctrico WEG del sistema de bombeo.

### **3.5.1 Contexto operacional:**

El sistema de bombeo de la empresa PROCEAL SA está ubicado en el municipio de Aipe, Huila. Este municipio se encuentra a una altitud de aproximadamente 350 metros sobre el nivel del mar, con un clima cálido y una temperatura promedio anual de 28.4°C. La región tiene temporadas de sequía prolongadas, lo que hace necesario un sistema de bombeo eficiente para asegurar el suministro de agua a los estanques. El sistema de bombeo debe suministrar un promedio de 2800 GPM, para garantizar el recambio de agua en los estanques.

### **3.6 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) para Establecer un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)**

El Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidad (AMEF) tiene como objetivo identificar las posibles formas en que un sistema puede fallar, lo que podría comprometer su funcionamiento, así como evaluar las consecuencias de cada uno de estos fallos. (Moubray, 1997) Su principal contribución es el cálculo del Número de Ponderación de Riesgos (NPR), que ayuda a valorar las diferentes causas que provocan daños en un equipo o sistema.

Aplicando las siete preguntas claves del análisis RCM, se llevó a cabo un análisis de modos de fallas que permita identificar las anomalías que se presentan en los subsistemas del equipo de bombeo.

#### ***3.6.1 Valoración del Riesgo***

El NPR es el indicador clave en un AMEF para priorizar fallos según su criticidad. Se calcula multiplicando tres factores:

Fórmula:

$$NPR = \text{Severidad } (S) * \text{Ocurrencia } (O) * \text{Detección } (D) \quad (\text{Ecuación 6})$$

#### ***3.6.2 Severidad***

La “Matriz de decisiones” juega un papel fundamental en la planificación del mantenimiento, por lo que es crucial definir con precisión los componentes del NPR. Este valor

permite determinar la criticidad de cada equipo, asegurando una priorización adecuada en el mantenimiento.

**Tabla 5**

*Valoración de severidad.*

<b>VALOR</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>1</b>	El fallo no genera impactos significativos.
<b>2 Y 3</b>	No hay consecuencias para seguridad y afines, producción y calidad
<b>4, 5 O 6</b>	El fallo aumenta los costos de mantenimiento y afecta levemente la producción o calidad, provocando paradas breves y posibles mermas.
<b>7 Y 8</b>	El fallo tiene un impacto significativo en la producción, calidad y costos de mantenimiento.
<b>9 Y 10</b>	Se trata de graves consecuencias para seguridad y afines.

Nota: La tabla clasifica la severidad de fallos según su impacto.

### ***3.6.3 Ocurrencia de fallos***

La ocurrencia de fallos se refiere al número de veces que un equipo ha presentado fallas dentro de un periodo específico.

**Tabla 6**

*valoración de ocurrencia de fallos.*

<b>VALOR</b>	<b>OCURRENCIA DE FALLOS</b>
<i>1</i>	<i>Menos de 1 en más de 10 años.</i>
<i>2</i>	<i>Entre 1 y 3 en más de 10 años.</i>
<i>3</i>	<i>Entre 1 y 3 en 10 años.</i>
<i>4</i>	<i>Entre 1 y 3 en 5 años.</i>
<i>5</i>	<i>Entre 1 y 3 en 2 años.</i>
<i>6</i>	<i>Entre 1 y 3 por año.</i>
<i>7</i>	<i>Entre 1 y 3 cada seis meses.</i>
<i>8</i>	<i>Entre 1 y 3 cada dos meses.</i>
<i>9</i>	<i>Entre 1 y 3 cada semana.</i>
<i>10</i>	<i>Entre 1 y 3 por día.</i>

Nota: La tabla clasifica la ocurrencia de fallos según valoración de riesgo. (Gardella Gonzales, 2011)

#### **3.6.4 Detección de fallos**

Mide la probabilidad de identificar un fallo antes de que cause un impacto significativo. Se evalúa en una escala donde una detección inmediata y segura recibe una calificación baja, mientras que una detección difícil o imposible obtiene una puntuación alta.

**Tabla 7**

*valoración de detección de fallos.*

<b>VALOR</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>1</b>	<i>El fallo se detecta de inmediato, sin dudas, por cualquier persona y de manera clara.</i>
<b>2</b>	<i>La detección es casi segura, pero puede necesitar la revisión de un técnico u operario especializado.</i>
<b>3, 4 Y 5</b>	<i>La detección es confiable, pero requiere un método, técnica o tiempo para un diagnóstico definitivo.</i>
<b>6, 7 Y 8</b>	<i>La detección implica riesgo de error y requiere recursos y un tiempo considerable para diagnosticar la falla.</i>
<b>9 Y 10</b>	<i>La detección es casi imposible o inviable con la tecnología actual.</i>

Nota: Clasificación de detección de fallos según valoración de riesgo (Gardella Gonzales, 2011)

### **3.6.5 Sistema y subsistemas por evaluar.**

El sistema de bombeo, como equipo crítico, se evalúa descomponiéndolo en subsistemas clave (motor eléctrico, bomba, tuberías y válvulas) para priorizar mantenimiento en los componentes de mayor impacto operativo y evitar fallos que afecten la producción y seguridad.

**Tabla 8**

*Taxonomía de sistema y subsistema de equipo crítico.*

<b>TAXONOMÍA</b>	
<b>SISTEMA</b>	<b>SUBSISTEMA</b>
<b>Sistema de bombeo de agua</b>	Bomba HIDROMAC ETN 200/315
	Motor eléctrico WEG de alta eficiencia a 1.750 - 100 HP
	Tubería de lámina de 14 pulgadas
	Válvulas (1 válvula mariposa 10" y 1 válvula compuerta 10")

Nota: Tabla de taxonomía del equipo crítico con sus subsistemas.

Tabla 9

## Análisis de modos y efectos de fallas – Bomba HIDROMAC ETN 200/315

Análisis funcional						Consecuencias de fallo					Valoración de riesgo					
Análisis de Modos y Efectos de Falla. (AMEF)		Sistema	Sistema de bombeo de agua PROCEAL S.A.			FALLO OCULTO	EVIDENTES					SEVERIDAD	O. FALLOS	DETECCIÓN	N.P.R.	
		Subsistema	Bomba HIDROMAC ETN 200/315				SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	SALUD	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO						
Función.	Falla funcional.	Modos de falla.			Efectos de falla.											
		clasificación I	clasificación II	clasificación III												
1	A	1	Válvula cheque no sella.	Desgaste del asiento o disco.	Fatiga del material	1A1	Retorno del agua, no cierra el paso en circulación en contraflujo.	NO	NO	NO	SI	SI	9	4	2	72
					Mala instalación, falta de capacitación del personal.			NO	NO	NO	SI	SI	9	5	2	90
		2	Atascamiento en los rodamientos y rodete.	Falla prematura por fatiga.	Mala selección de rodamientos.	1A2	Se produce desgaste en los bordes de los alabes al entrar en contacto con las aristas debido al entre giro.	NO	NO	NO	SI	SI	7	4	2	56
				Fallo de lubricación.	Personal no capacitado.			NO	NO	NO	SI	SI	8	7	2	112
				Mala instalación.	Personal no capacitado.			NO	NO	NO	SI	SI	7	3	3	63
		3	Desacople del eje de la bomba al motor.	Ruptura de tornillos de fijación en la brida de acople.	Mala elección del material de los tornillos.	1A3	Interrupción inmediata del flujo y presión en el sistema, provocando una pérdida total de la capacidad de bombeo.	NO	NO	NO	SI	SI	8	2	2	32
	Fallo del acople omega.			Mala instalación, falta de capacitación del personal.	NO			NO	NO	SI	SI	9	2	2	36	
	4	Cabeza de succión obstruida con sedimentos.	Fallo en elección de filtro de cabeza de succión.		1A4	Se reduce el caudal de agua, lo que puede causar cavitación, sobrecalentamiento, mayor consumo de energía	NO	NO	NO	SI	SI	6	2	2	24	
	B	Bombee agua a un caudal menor de 2800 GPM.	1	Desgaste del rodete.	Abrasión en los alabes.	1B1	Reducción de caudal y la presión de la bomba, aumento de vibraciones y desequilibrio.	NO	NO	NO	SI	SI	5	2	5	50
					Corrosión en los alabes.			NO	NO	NO	SI	SI	5	2	5	50
					Cavitación en los alabes.			NO	NO	NO	SI	SI	5	2	5	50
	2	Cabeza de succión parcialmente obstruida con sedimentos.	Filtro de succión obstruido.	Falta de mantenimiento al filtro.	1B2	Se reduce el caudal de agua, genera cavitación, sobrecalentamiento, mayor consumo de energía.	NO	NO	NO	SI	SI	6	2	1	12	
	3	Mala operación de válvulas.	Capacitación del personal.		1B3	Operación debajo del caudal mínimo requerido.	NO	NO	NO	SI	SI	4	3	1	12	
	C	Fuga de agua por sello mecánico.	1	Atascamiento del fuelle del sello mecánico.	Perdida de presión en el fuelle del sello.	Desgaste normal del sello.	1C1	El sello no retiene el fluido en la operación de bombeo.	NO	NO	NO	SI	SI	9	2	4
2			Fuga por cuerpo de la bomba.	Torque inadecuado en los tornillos de la carcasa.	Mala elección de empaque de la bomba.	1C2	Se produce una fuga de fluido por la parte protectora de la bomba.	NO	NO	NO	SI	SI	9	2	2	36

Nota: Clasificación de modos y efectos de falla, consecuencia y valoración del riesgo para la Bomba HIDROMAC ETN 200/315.

Tabla 10

## Análisis de modos y efectos de fallas – Motor eléctrico WEG a 1.750 RPM –100 HP

Análisis funcional						Consecuencias de fallo					Valoración de riesgo					
Análisis de Modos y Efectos de Falla. (AMEF)		Sistema	Sistema de bombeo de agua PROCEAL S.A.			FALLO OCULT	EVIDENTES				SEVERIDAD	O. FALLOS	DETECCIÓN	N.P.R.		
		Subsistema	Motor eléctrico WEG de alta eficiencia a 1.750 RPM - 100 HP				SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	SALUD	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO						
Función.	Falla funcional.	Modos de falla.			Efectos de falla.	FALLO OCULT					SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	SALUD	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO	SEVERIDAD	O. FALLOS
		clasificación I	clasificación II	clasificación III												
1	A	El motor no gira.	1	Fallo en la alimentación de corriente del motor.	Ausencia de tensión en el circuito.	1A1	No permite que el motor arranque debido a una falla de comunicación en el tablero eléctrico.	NO	NO	NO	SI	SI	9	4	2	72
				Fallo en el devanado del motor.	El bobinado está roto o quemado.			NO	NO	NO	SI	SI	9	5	2	90
				Falla de conexiones en el motor.	Mala instalación.			NO	NO	NO	SI	SI	7	4	2	56
		2	Eje bloqueado por rodamientos dañados.	Fallo en rodamientos	Entrada de agua o suciedad.	1A2	Desgaste o daños en los rodamientos que bloquean el eje.	NO	NO	NO	SI	SI	7	6	2	84
				Fallo de engrase				NO	NO	NO	SI	SI	7	3	3	63
				Desalineación	Mala instalación.			NO	NO	NO	SI	SI	7	4	3	84
		3	Rotación bloqueada.	Carga excesiva	Mala operación.	1A3	El rotor no gira o se produce un sobrecalentamiento.	NO	NO	NO	SI	SI	8	2	2	32
				Protección activada	Mala operación.			NO	NO	NO	SI	SI	9	2	2	36
		B	Temperatura del motor supera los 40°C	1	Bajo aislamiento en las bobinas del motor.	Salta protección térmica	1B1	exceso de calor en el bobinado.	NO	NO	NO	SI	SI	6	2	2
	2			Fallo en ventilación del motor.	Rejilla de obstruida. Ventilador roto.	1B2	Temperatura excesiva que afecta componentes internos.	NO	NO	NO	SI	SI	5	2	5	50
	C	El motor no sostiene o no supera las 1500 RPM.	1	Desgaste en los rodamientos.	Desgaste prematuro por suciedad.	1C1	El sello impide el movimiento del eje rotatorio.	NO	NO	NO	SI	SI	5	2	5	50
			2	Falla en el controlador de velocidad.	Mala operación	1C2	Discrepancia en la impedancia entre la fuente y la carga.	NO	NO	NO	SI	SI	6	2	1	12
			3	Desalineación y desequilibrio del eje.	Mal montaje o desgaste mecánico.	1C3	El motor no está alineado correctamente con la bomba.	NO	NO	NO	SI	SI	6	2	1	12

**NOTA:** Clasificación de modos y efectos de falla, consecuencia y valoración del riesgo del motor eléctrico WEG.

**Tabla 11**

*Análisis de modos y efectos de fallas – Tubería en lámina de 14”*

Análisis funcional						Consecuencias de fallo					Valoración de riesgo				
						FALLO OCULTO	EVIDENTES				GRAVEDAD	FREC. FALLOS	DETECTABILIDAD	N.P.R.	
ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA (AMEF)	Sistema	Sistema de bombeo de agua PROCEAL S.A.			SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE		SALUD	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO						
Función.	Falla funcional.	Modo de falla.	Efectos de falla.												
1	A	Fuga de fluido.	1	Perforación o desgaste del material debido a corrosión.	1A1	Pérdida significativa de agua, aumento de costos operativos y potencial contaminación del área.	NO	NO	NO	SI	SI	6	4	2	48
			2	Falla en las juntas o uniones por instalación defectuosa o envejecimiento de los sellos.	1A2	Reducción de la presión en el sistema, causando un flujo ineficiente o interrupciones en el bombeo.	NO	NO	NO	SI	SI	6	4	1	24
			3	Fisuras o grietas causadas por presión excesiva o impactos externos.	1A3	Posibilidad de una falla catastrófica que detenga completamente el sistema, afectando el suministro.	NO	NO	NO	SI	SI	4	4	2	32
	B	Obstrucciones internas.	1	Acumulación de sedimentos o ingreso de partículas sólidas transportadas por el agua.	1B1	Bloqueo total o parcial que provoca interrupciones en el suministro de agua y posibles daños en la bomba.	NO	NO	NO	SI	SI	5	6	2	60
			2	Formación de incrustaciones por depósitos minerales.	1B2	Disminución progresiva del flujo y un desgaste acelerado de las paredes internas de la tubería.	NO	NO	NO	SI	SI	7	3	3	63
	C	Deformaciones estructurales.	1	Colapso del material por presión interna superior al límite de diseño.	1C1	Interrupción súbita del flujo y posibilidad de daños en equipos asociados, como válvulas y bombas.	NO	NO	NO	SI	SI	8	1	1	8
			2	Deformación por impactos externos como maquinaria o vehículos cercanos.	1C2	Riesgo de fugas o roturas que afecten el suministro continuo y generen costos de reparación.	NO	NO	NO			8	2	2	32
			3	Fatiga del material debido a ciclos repetidos de presión y temperatura.	1C3	Deterioro progresivo que culmina en fallas inesperadas, afectando la confiabilidad del sistema.	NO	NO	NO	SI	SI	9	2	2	36

**NOTA:** Clasificación de modos y efectos de falla, consecuencia y valoración del riesgo para la tubería de 14” del sistema de bombeo.

**Tabla 12**

*Análisis de modos y efectos de fallas – válvulas (1 válvula mariposa 10” y 1 válvula compuerta 10”).*

Análisis funcional						Consecuencias de fallo				Valoración de riesgo						
						FALLO OCULTO	EVIDENTES			SEVERIDAD	O. FALLOS	DETECCIÓN	N.P.R.			
SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	SALUD	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO													
Análisis de Modos y Efectos de Falla. (AMEF)	Sistema	Sistema de bombeo de agua PROCEAL S.A.														
	Subsistema	válvulas (1 válvula mariposa 10” y 1 válvula compuerta 10”)														
Función.	Falla funcional.	Modo de falla.	Efectos de falla.													
1	Válvula Mariposa - regular o bloquea el flujo en tuberías mediante el disco giratorio.	A	Fallo en el cierre o apertura completa de la válvula.	1	Desgaste del sello elástico por envejecimiento o uso prolongado.	1A1	Fugas que disminuyen la eficiencia del sistema y provocan pérdidas económicas por desperdicio de agua.	NO	NO	NO	SI	SI	5	3	2	30
		B	Pérdida de estanqueidad (fugas).	1	Corrosión en el disco o eje de la válvula debido a exposición al agua o productos químicos.	1B1	Dificultad para operar la válvula, potencialmente afectando el control de flujo y causando fallos mecánicos.	NO	NO	NO	SI	SI	4	1	2	8
		C	Obstrucción del flujo de agua.	1	Acumulación de residuos o incrustaciones en el área del disco que impiden su movimiento libre.	1C1	Incremento en la resistencia al flujo, reducción del caudal y mayor esfuerzo en el sistema de bombeo.	NO	NO	NO	SI	SI	6	4	2	48
2	Válvula compuerta - abre o cierra completamente el flujo en las tuberías mediante un mecanismo de cierre vertical.	A	Dificultad para abrir o cerrar completamente la válvula	1	Desgaste de la compuerta y el asiento debido al contacto repetido bajo presión.	1A1	Fugas continuas que afectan el control de flujo y generan mayores costos operativos.	NO	NO	NO	SI	SI	5	1	2	10
		B	Pérdida de sellado, permitiendo fugas.	1	Deformación del vástago por sobreesfuerzo durante la operación.	1B1	Inhabilidad para cerrar o abrir completamente, comprometiendo el funcionamiento del sistema.	NO	NO	NO	SI	SI	4	1	1	4
		C	Bloqueo parcial o total del flujo.	1	Corrosión o adherencia de partículas en la compuerta, dificultando su desplazamiento.	1C1	Obstrucción parcial que limita el caudal, aumenta las pérdidas de presión y puede dañar otros componentes.	NO	NO	NO	SI	SI	7	2	1	14

**Nota:** Clasificación de modos y efectos de falla, consecuencia y valoración del riesgo para las válvulas del sistema de bombeo.

#### **4. PLAN DE MANTENIMIENTO A PARTIR DEL AMEF**

En la gestión de calidad y la ingeniería de confiabilidad, el AMEF (Análisis de Modos de Fallo y Efectos) desempeña un papel esencial en la planificación de tareas de mantenimiento. A través de la identificación de posibles modos de fallo en el sistema de bombeo de agua, este análisis permite a los equipos técnicos prever problemas potenciales y desarrollar estrategias de mantenimiento específicas para cada escenario. Estas tareas de mantenimiento incluyen inspecciones regulares, ajustes preventivos y reemplazo de componentes antes de que se produzcan fallos.

A partir del análisis realizado con el AMEF, se definen procedimientos detallados que aseguran la seguridad y la eficiencia operativa. En el caso del sistema de bombeo de agua, las tareas abarcan desde la verificación de los motores y bombas hasta la revisión de las válvulas y tuberías. Este enfoque proactivo no solo reduce la probabilidad de fallos inesperados, sino que también optimiza los costos al prevenir daños mayores y garantizar la durabilidad del sistema.

En las siguientes secciones, se detallan las acciones específicas para cada escenario, proporcionando una guía clara y práctica que permita mantener la integridad y funcionalidad del sistema de bombeo en condiciones óptimas.

Tabla 13

Matriz de decisión bomba HIDROMAC ETN 200/315

Matriz de decisiones Bomba HIDROMAC ETN 200/315																		
EFECTO DE FALLA	N.P.R.	SELECCIÓN DE TAREAS						DETALLE DE LA TAREA										
		Predictivas	Preventivas por inspección	Preventivas por Acción	Sustitución cíclica	Correr a falla	Rediseño	Descripción de la tarea propuesta	Frecuencia	Responsable	Tiempo de Actividad (h)	No. de Personas	Horas hombre totales	Estado equipo (En línea - Apagado)	Costo producción (h)	Costo HH	Repuesto requerido	Costo tarea
1A1	72		X					Inspeccionar periódicamente el estado de la válvula cheque y su asiento.	3 meses	Personal operativo.	0,5	2	1	Apagado	\$ 1.200.000	\$ 50.000	\$ -	\$ 1.250.000
	90						X	Contratación de personal idóneo para la actividad.					0					\$ -
1A2	56						X	Capacitación a personal					0					\$ -
	112	X						Análisis frecuencial	6 meses	Personal calificado externo	1	1	1	En línea	\$ -	\$ 800.000	\$ -	\$ 800.000
	63						X	Capacitación a personal					0					\$ -
	84	X						Análisis de vibraciones.	6 meses	Personal calificado externo	1	1	1	En línea	\$ -	\$ 800.000	\$ -	\$ 800.000
1A3	32					X		Apretar o reemplazar tornillos flojos o rotos.	12 meses	Personal de mantenimiento.	0,5	1	0,5	Apagado	\$ 600.000	\$ 50.000	\$ 200.000	\$ 825.000
	36	X						Análisis de vibraciones.	6 meses	Personal calificado externo	1	1	1	En línea	\$ -	\$ 800.000	\$ -	\$ 800.000
1A4	24			X				Limpiar regularmente el filtro de succión.	1 Mes	Personal operativo.	0,17	1	0,17	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 8.500
1B1	50	X						Análisis de vibraciones.	6 meses	Personal calificado externo	1	1	1	En línea	\$ -	\$ 800.000	\$ -	\$ 800.000
	50	X																
	50	X																
1B2	12			X				Realizar limpieza de filtro de succión.	1 mes	Personal operativo.	0,5	1	0,5	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 25.000
1B3	12			X				Revisión de señalización.	1 Mes	Personal operativo.	0,5	1	0,5	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 25.000
1C1	72				X			Reemplazo de sello mecánico	12 meses	Personal de mantenimiento.	2	2	4	Apagado	\$ 2.400.000	\$ 50.000	\$ 350.000	\$ 2.950.000
1C2	36			X				Verificación de fugas y torque de tornillos	6 meses	Personal de mantenimiento.	0,17	1	0,17	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 8.500
<b>TOTAL</b>																	<b>\$ 8.292.000</b>	

Nota: La matriz de decisión para el equipo bomba HIDROMAC ETN 200/315, se compone de la referencia del efecto de la falla, su valor calculado de NPR, la descripción de la tarea propuesta, periodicidad y sus respectivos costos.

Tabla 14

Matriz de decisiones Motor eléctrico WEG de alta eficiencia a 1.750 RPM - 100 HP.

Matriz de decisiones Motor eléctrico WEG de alta eficiencia a 1.750 RPM - 100 HP																	
EFECTO DE FALLA	N.P.R.	SELECCIÓN DE TAREAS					DETALLE DE LA TAREA										
		Predictivas	Preventivas por inspección	Preventivas por Acción	Sustitución cíclica	Correr a falla	Rediseño	Descripción de la tarea propuesta	Frecuencia	Responsable	Tiempo de Actividad (h)	No. de Personas	Horas hombre totales	Estado equipo (En línea - Apagado)	Costo producción (h)	Costo HH	Repuesto requerido
1A1	72	X	X				Inspección visual de conexiones y revisan de tensiones en fases.	1 mes	Personal de mantenimiento	0,25	1	0,25	En Línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 12.500
	90		X				Medición de aislamiento de devanado	12 meses	Personal de mantenimiento	1	1	1	En Línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 50.000
	56		X				Revisión de conexiones, terminales sulfatados y limpieza de tablero.	6 meses	Personal de mantenimiento	1	1	1	Apagado	\$ 1.200.000	\$ 50.000	\$ -	\$ 1.250.000
1A2	84	X					Análisis de vibraciones.	6 meses	Contratación de personal idóneo para la actividad.	1	1	1	En Línea	\$ -	\$ 800.000	\$ -	\$ 800.000
	63		X				Engrase general de rodamientos y chumaceras.	3 meses	Personal de mantenimiento	2	1	2	En Línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 100.000
	84		X				Alineación de acoplamiento bomba-motor.	6 meses	Contratación de personal idóneo para la actividad.	1	1	1	En Línea	\$ -	\$ 800.000	\$ -	\$ 800.000
1A3	32	X					Inspección de parámetros de operación	1 día	Personal operativo	0,17	1	0,17	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 8.500
	36	X					Check list de funcionamiento inicial	1 día	Personal operativo	0,17	1	0,17	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 8.500
1B1	24		X				Medición de aislamiento de devanado	12 meses	Personal de mantenimiento	1	1	1	En Línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 50.000
1B2	50		X				Limpieza de carcasa y rejillas de motor.	4 meses	Personal de mantenimiento	0,5	1	0,5	Apagado	\$ 600.000	\$ 50.000	\$ -	\$ 625.000
	50			X			Cambio de aspas de ventilacion	18 meses	Personal de mantenimiento	0,5	1	0,5	Apagado	\$ 600.000	\$ 50.000	\$ 350.000	\$ 975.000
1C1	50	X					Análisis de vibraciones.	6 meses	Contratación de personal idóneo para la actividad.	1	1	1	En línea	\$ -	\$ 800.000	\$ -	\$ 800.000
1C2	12		X				Monitoreo de parámetros de temperatura, voltaje y velocidad.	1 día	Personal operativo	0,17	1	0,17	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 8.500
1C3	12		X				Alineacion de acoplamiento bomba-motor.	12 meses	Contratación de personal idóneo para la actividad.	1	1	1	Apagado	\$ 1.200.000	\$ 800.000		\$ 2.000.000
<b>TOTAL</b>																<b>\$ 7.488.000</b>	

Nota: Nota: La matriz de decisión para *Motor eléctrico WEG*, se compone de la referencia del efecto de la falla, su valor calculado de NPR, la descripción de la tarea propuesta, periodicidad y sus respectivos costos.

Tabla 15

## Matriz de decisiones Tubería en lámina de 14 pulgadas

Matriz de decisiones Tubería en lámina de 14 pulgadas																	
EFECTO DE FALLA	N.P.R.	SELECCIÓN DE TAREAS						DETALLE DE LA TAREA									
		Predictivas	Preventivas por inspección	Preventivas por Acción	Sustitución cíclica	Correr a falla	Rediseño	Descripción de la tarea propuesta	Frecuencia	Responsable	Tiempo de Actividad (h)	No. de Personas	Horas hombre totales	Estado equipo (En línea - Apagado)	Costo producción (h)	Costo HH	Repuesto requerido
1A1	48	X					Ultrasonido.	12 meses	Contratación de personal idóneo para la actividad.	1	1	1	En línea	\$ -	\$ 800.000	\$ -	\$ 800.000
1A2	24				X		Sustituir empaques y sellos de las juntas si estos presentan fugas.	36 meses	Personal de mantenimiento	1	2	2	Apagado	\$ 1.200.000	\$ 50.000	\$ 780.000	\$ 2.080.000
1A3	32		X				Inspeccion visual de tubería	6 meses	Personal operativo	0,5	1	0,5	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 25.000
1B1	60			X			Purga de tuberías	6 meses	Personal de mantenimiento	0,5	1	0,5	Apagado	\$ 600.000	\$ 50.000	\$ -	\$ 625.000
1B2	63		X				Inspeccion de tubería	12 meses	Personal de mantenimiento	0,5	1	0,5	Apagado	\$ 600.000	\$ 50.000	\$ -	\$ 625.000
1C1	8		X				Inspeccion de tubería	12 meses	Personal de mantenimiento	0,5	1	0,5	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 25.000
1C2	32			X			Demarcación de la zona por donde pasa la tubería.	6 meses	Personal operativo	0,5	1	0,5	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ 100.000	\$ 125.000
1C3	36	X					Pruebas de dureza sobre la superficie de la tubería.	12 meses	Personal de mantenimiento	0,5	1	0,5	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ 100.000	\$ 125.000
<b>TOTAL</b>																<b>\$ 4.430.000</b>	

Nota: La matriz de decisión para la Tubería en lámina de 14 pulgadas, se compone de la referencia del efecto de la falla, su valor calculado de NPR, la descripción de la tarea propuesta, periodicidad y sus respectivos costos.

**Tabla 16**

*Matriz de decisiones válvulas (1 válvula mariposa 10" y 1 válvula compuerta 10")*

Matriz de decisiones válvulas (1 válvula mariposa 10" y 1 válvula compuerta 10")																	
EFECTO DE FALLA	N.P.R.	SELECCIÓN DE TAREAS						DETALLE DE LA TAREA									
		Predictivas Preventivas por inspección	Preventivas por Acción	Sustitución cíclica	Correr a falla	Rediseño	Descripción de la tarea propuesta	Frecuencia	Responsable	Tiempo de Actividad (h)	No. de Personas	Horas hombre totales	Estado equipo (En línea - Apagado)	Costo producción (h)	Costo HH	Repuesto requerido	Costo tarea
1A1	30			X			Reemplazar el sello	36 meses	Personal de mantenimiento	0,5	1	0,5	Apagado	\$ 1.200.000	\$ 50.000	\$ -	\$ 1.225.000
1B1	8	X					Inspeccionar la superficie.	3 meses	Personal operativo	0,17	1	0,17	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 8.500
1C1	48		X				Realizar ciclos de apertura/cierre.	1 mes	Personal operativo	0,17	1	0,17	En línea	\$ -	\$ 50.000		\$ 8.500
1A1	10		X				Lubricar el vástago y tuerca con grasa de alta presión.	12 meses	Personal de mantenimiento	0,25	1	0,25	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ 100.000	\$ 112.500
1B1	4					X	Capacitar operarios en fuerza correcta de giro					0		\$ -			\$ -
1C1	14		X				Realizar ciclos de apertura/cierre.	1 mes	Personal operativo	0,17	1	0,17	En línea	\$ -	\$ 50.000	\$ -	\$ 8.500
																<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1.363.000</b>

Nota: La matriz de decisión para las válvulas, se compone de la referencia del efecto de la falla, su valor calculado de NPR, la descripción de la tarea propuesta, periodicidad y sus respectivos costos.

Las tareas propuestas están diseñadas para abordar las causas raíz de cada modo de falla, desde la corrosión, las juntas defectuosas, la acumulación de sedimentos, fatiga del material, intervenciones preventivas (lubricación, limpieza) y correctivas (reemplazo de sellos, rectificación de componentes) según la criticidad. Este enfoque no solo busca reparar daños existentes, sino también anticipar y mitigar futuros problemas, extendiendo la vida útil del sistema y optimizando su rendimiento.

Estas tareas propuestas también buscan reducir paradas no planificadas y optimizar recursos a través de un enfoque sistemático respaldado por datos técnicos y condiciones reales de operación.

## **5. ANALISIS COSTO BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACION DEL PLAN DE MANTENIMIENTO**

La metodología del análisis costo-beneficio consiste en identificar, cuantificar y comparar los costos y beneficios de un proyecto o decisión, expresándolos en términos monetarios para determinar su viabilidad. Primero, se enumeran todos los costos (inversiones, operación, mantenimiento) y beneficios (ingresos, ahorros, impactos positivos), luego se valoran en el tiempo aplicando una tasa de descuento para obtener valores presentes. Finalmente, se calculan indicadores como el Valor Actual Neto o la Relación Beneficio-Costo para evaluar si los beneficios superan los costos. Los beneficios de este análisis incluyen una toma de decisiones objetiva, priorización de proyectos rentables, optimización de recursos y evaluación de impactos

económicos y sociales, facilitando la elección de alternativas con mayor retorno para la organización.

**Tabla 17**

*Inversión Inicial para Implementar RCM*

<b>Inversión Inicial para Implementar RCM</b>			
<b>ítem</b>	<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo(COP)</b>
<b>1</b>	<b>Análisis de Modos de Falla (AMEF)</b>	Análisis de ingeniería para identificar fallas críticas.	\$ 3.000.000
<b>2</b>	<b>Capacitación del Personal</b>	Entrenamiento en RCM y herramientas predictivas.	\$ 2.000.000
<b>3</b>	<b>Equipos de Monitoreo</b>	Equipos de toma de datos, calibración y sensores de vibración.	\$ 4.000.000
		Software de análisis	\$ 8.000.000
<b>4</b>	<b>Herramienta</b>	Herramienta especializada para las rutinas de mantenimiento.	\$ 1.500.000
<b>5</b>	<b>Desarrollo de Planes de Mantenimiento</b>	Elaboración de cronogramas y procedimientos.	\$ 1.500.000
<b>6</b>	<b>Pruebas Piloto</b>	Implementación en el sistema.	\$ 1.500.000
<b>7</b>	<b>Contingencias (10%)</b>	Imprevistos.	\$ 3.500.000
	<b>Total, Inversión Inicial</b>		<b>\$25.000.000</b>

Nota: Relación de costos para inversión inicial de la implementación del RCM.

La tabla 17 es un estimado de los costos de implementación del RCM, ya que la empresa cuenta con algunos equipos de medición, de cómputo y el personal necesario para implementar el plan de mantenimiento RCM. El total estimado para la inversión inicial es de \$25.000.000 COP.

Para el cálculo de la viabilidad de la implantación de la metodología RCM, se realiza una comparación detallada entre los costos del mantenimiento basado en confiabilidad y los costos del mantenimiento tradicional utilizado actualmente por la empresa. Para esto, se utilizan registros de facturas, que incluyen tanto costos directos como indirectos asociados con las actividades de mantenimiento. Además, se consideran estimaciones técnicas de las paradas de equipo, analizando su frecuencia y duración, junto con su impacto cuantificable en la producción y eficiencia operativa del sistema de bombeo.

La Tabla 18 presenta un comparativo anual de costos entre dos enfoques de mantenimiento aplicados a los cuatro subsistemas del sistema de bombeo de agua: el mantenimiento tradicional y el RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). Este análisis detalla los gastos asociados a conceptos clave como reparaciones emergentes, inventario de repuestos y tiempo de inactividad, evidenciando las diferencias económicas entre ambas metodologías.

**Tabla 18***Tabla anual de costos de mantenimiento tradicional vs RCM*

<b>Costos Anuales</b>				
<b>Subsistema</b>	<b>Concepto</b>	<b>Mantenimiento Tradicional (COP)</b>	<b>RCM (COP)</b>	<b>Diferencia (COP)</b>
<b>Costo anual de mantenimiento de la Bomba HIDROMAC ETN 200/315.</b>	Reparaciones emergentes/Planeado	\$ 9.800.000	\$ 7.544.000	\$ 2.256.000
	Inventario de repuestos	\$ 950.000	\$ 550.000	\$ 400.000
	Tiempo de inactividad	\$ 14.000.000	\$ 7.800.000	\$ 6.200.000
<b>Costo anual de mantenimiento del Motor eléctrico WEG de alta eficiencia a 1.750 RPM - 100 HP.</b>	Reparaciones emergentes/Planeado	\$ 16.400.000	\$ 14.982.500	\$ 1.417.500
	Inventario de repuestos	\$ 950.000	\$ 350.000	\$ 600.000
	Tiempo de inactividad	\$ 13.400.000	\$ 6.000.000	\$ 7.400.000
<b>Costo anual de mantenimiento de la Tubería en lámina de 14 pulgadas</b>	Reparaciones emergentes/Planeado	\$ 2.500.000	\$ 1.200.000	\$ 1.300.000
	Inventario de repuestos	\$ 1.100.000	\$ 1.080.000	\$ 20.000
	Tiempo de inactividad	\$ 6.500.000	\$ 2.400.000	\$ 4.100.000
<b>Costo anual de mantenimiento de las válvulas (1 válvula mariposa 10" y 1 válvula compuerta 10")</b>	Reparaciones emergentes/Planeado	\$ 1.100.000	\$ 338.000	\$ 762.000
	Inventario de repuestos	\$ 800.000	\$ 100.000	\$ 700.000
	Tiempo de inactividad	\$ 6.500.000	\$ 1.200.000	\$ 5.300.000
<b>Total, Costos</b>		<b>\$ 74.000.000</b>	<b>\$ 43.544.500</b>	<b>\$ 30.455.500</b>

Nota: Relación de costos anual de los subsistemas, entre el mantenimiento tradicional vs RCM.

Los resultados muestran que el RCM genera ahorros significativos en todos los rubros evaluados, con una diferencia total favorable de \$30.465.500 COP al año. Destacan las reducciones en tiempos de inactividad (especialmente en bombas y tuberías) y en costos de inventario, lo que sugiere que el RCM no solo optimiza recursos financieros, sino que también mejora la eficiencia operativa. Esta tabla sirve como base para evaluar la viabilidad de implementar estrategias de mantenimiento más avanzadas y rentables.

Para evaluar la rentabilidad de la implementación del RCM, se calculó el Retorno sobre la Inversión (ROI) utilizando como base el ahorro anual y la inversión inicial. Este indicador financiero permite cuantificar el rendimiento porcentual obtenido en relación con los recursos invertidos, ofreciendo una métrica clara para la toma de decisiones.

Datos para el cálculo del ROI:

Ahorro anual (Beneficio neto) \$30.455.500

inversión inicial \$25.000.000

**Fórmula del ROI:**

$$ROI = \left( \frac{\text{Beneficio neto} - \text{Inversión inicial}}{\text{Inversión inicial}} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$ROI = \left( \frac{\$30.455.500 - \$25.000.000}{\$25.000.000} \right) * 100 = 21,82 \%$$

### Interpretación de Resultados:

El ROI del **21.82%** en el primer año demuestra que el RCM no solo es autosostenible, sino también altamente rentable: Por cada \$1.000.000 COP invertidos en RCM, se recuperan \$1.218.200 COP en el primer año, superando la inversión inicial. Este resultado refuerza la viabilidad económica del proyecto, destacando su capacidad para generar ahorros significativos desde el primer año y optimizar los costos de mantenimiento a largo plazo.

#### 5.1 Cálculo de la TIR (Tasa Interna de Retorno)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es una medida utilizada en finanzas para evaluar la rentabilidad de una inversión. Representa la tasa de descuento que iguala el valor presente neto (VPN) de los flujos de caja futuros de una inversión con la inversión inicial. En otras palabras, es la tasa a la cual el valor presente de los ingresos proyectados iguala el valor de la inversión realizada. La TIR es una herramienta crucial para tomar decisiones de inversión, ya que permite comparar la rentabilidad de diferentes proyectos y determinar cuál ofrece el mayor retorno.

La tasa de descuento refleja el costo de oportunidad del capital, es necesaria para analizar la inversión con el valor presente neto (VPN). Para proyectos industriales, se suele usar:

- Tasa mínima aceptable: 12-15%.

El VPN se calcula con la siguiente fórmula:

$$VPN = -Inversión Inicial + \sum_{t=1}^n \frac{Ahorro\ neto\ anual}{(1+tasa\ de\ descuento)^t} \quad \text{Ecuación 8}$$

Para el cálculo de la TIR del plan de mantenimiento RCM, se toma nuevamente Inversión de \$ 25.000.000 COP y Ahorros Anuales de \$ 30.455.500 COP y una tasa de descuento del 15%.

**Tabla 19**

*Flujo de Caja Proyectado (5 años)*

<b>Flujo de Caja Proyectado (5 años)</b>					
<b>Año</b>	<b>Flujo de Caja (COP)</b>		<b>Factor de Descuento (15%)</b>	<b>Valor Presente (COP)</b>	
<b>0</b>	<b>-\$</b>	<b>25.000.000,00</b>	<b>1</b>	<b>-\$</b>	<b>25.000.000</b>
<b>1</b>	<b>\$</b>	<b>30.455.500,00</b>	<b>0,869565217</b>	<b>\$</b>	<b>26.483.043</b>
<b>2</b>	<b>\$</b>	<b>30.455.500,00</b>	<b>0,756143667</b>	<b>\$</b>	<b>23.028.733</b>
<b>3</b>	<b>\$</b>	<b>30.455.500,00</b>	<b>0,657516232</b>	<b>\$</b>	<b>20.024.986</b>
<b>4</b>	<b>\$</b>	<b>30.455.500,00</b>	<b>0,571753246</b>	<b>\$</b>	<b>17.413.031</b>
<b>5</b>	<b>\$</b>	<b>30.455.500,00</b>	<b>0,497176735</b>	<b>\$</b>	<b>15.141.766</b>
<b>TIR VPN=0</b>	<b>119,4%</b>		<b>Total, VPN</b>	<b>\$</b>	<b>77.091.560</b> —

Nota: Calculo del del flujo de caja del proyecto con factor de descuento del 15%.

### **Interpretación de Resultados:**

El proyecto genera ganancias netas a valor presente, VPN = \$ 77.117.292 COP con una tasa de descuento del 15%. Lo que lo hace viable. Como la TIR (121.8%) es mayor que la tasa de descuento (15%), el VPN es positivo y alto, confirmando rentabilidad.

El proyecto ofrece beneficios estratégicos más allá del aspecto financiero, como la mejora en la eficiencia operativa y la confiabilidad de los equipos. La robustez de los indicadores (TIR

elevada y VPN positivo) indica que el RCM es resistente a escenarios adversos, convirtiéndolo en una inversión prioritaria. En conclusión, la implementación del RCM no solo es económicamente atractiva, sino también una solución integral para optimizar recursos y garantizar competitividad a largo plazo.

**Tabla 20**

*Comparación con Otras Tasas*

<b>Tasa de Descuento</b>	<b>VPN (COP)</b>	<b>Rentabilidad</b>
<b>12%</b>	+ 84.783.412	Máxima viabilidad.
<b>15%</b>	+ <b>77.117.292</b>	Excelente (TIR >> 15%).
<b>20%</b>	+ 58.217.340	Alta, pero menor margen.

Nota: Comparación del TIR con diferentes tasas de descuentos.

Inversión altamente recomendada hasta con una tasa de descuento del 20%, el valor presente neto (VPN) es positivo con \$58.2M COP, y la tasa interna de retorno (TIR) es del 121.8%, muy por encima del descuento del 20%.

### **5.1.1 Cálculo de Payback**

Por último, se realiza el cálculo del Payback, el cual indica el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial con los flujos de caja generados. Para el cálculo se tomará la tasa de descuento del 15%.

Ecuación para cálculo del Payback

$$Payback = \frac{Flujo\ de\ caja\ anual}{(1+tasa\ de\ descuento)^t}$$

Ecuación 9

**Tabla 21**

*Cálculo del payback con tasa del 15%:*

<b>Año</b>	<b>Flujo (COP)</b>	<b>VP (15%)</b>	<b>VP Acumulado</b>
<b>0</b>	- 25.000.000	- 25.000.000	- 25.000.000
<b>1</b>	30.455.500	26.496.285	+ <b>1.496.285</b>

Nota: El Payback descontado con costo de oportunidad del capital (15%).

El análisis del Payback descontado muestra que la inversión en RCM se recupera en 11 meses (0.94 años) con una tasa de descuento del 15%, demostrando una rentabilidad excepcional y un riesgo mínimo. Este rápido retorno se debe a los altos ahorros anuales (30.4 millones COP), que descontados, tienen un valor presente de 26.5 millones COP en el primer año. Esto valida la viabilidad financiera del proyecto y libera capital para reinversiones tempranas, reforzando su ventaja frente al mantenimiento tradicional. La combinación de un Payback acelerado, flujos de caja robustos y reducción de costos operativos hace del RCM una solución transformadora y altamente recomendable.

## **6. CONCLUSIONES**

El análisis realizado diagnosticó la ausencia de un plan de mantenimiento formal implementado para el sistema y los subsistemas del equipo de bombeo nombrado como activo crítico. Como resultado de esta evaluación, se determinó que el sistema de bombeo constituye un activo de un impacto directo en la continuidad operativa, lo que hace imperativa la implementación de un programa de mantenimiento estructurado que garantice su confiabilidad y disponibilidad.

Mediante la metodología AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Fallas), se evaluaron las fallas potenciales y recurrentes en el sistema de bombeo y equipos críticos, identificando sus causas, efectos y criticidad. Con base en este análisis, se definieron tareas de mantenimiento específicas por modo de falla, orientadas a mitigar riesgos, optimizar la confiabilidad y extender la vida útil de los activos. Estas acciones incluyen Inspección, lubricación, pruebas periódicas y capacitación del personal, asegurando una gestión proactiva de la operación.

Mediante un análisis costo-beneficio se determinó que el proyecto presenta un ROI (Retorno sobre la Inversión) del 22%, porcentaje que se encuentra dentro de los parámetros aceptables según los estándares del RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). Adicionalmente, la Tasa Interna de Retorno (TIR) confirmó la viabilidad financiera del proyecto, respaldando su implementación.

Un indicador clave es el playback o periodo de retorno de la inversión, el cual se estima en menos de 1 año, demostrando una rápida recuperación del capital invertido y generando rentabilidad en el corto plazo. Estos resultados refuerzan la conveniencia económica de avanzar con la iniciativa.

## BIBLIOGRAFIA

- Campos-López, O., Tolentino-Eslava, G., Toledo-Velázquez, M., & Tolentino-Eslava, R. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 23(1), 51-59. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v23n1a06>
- Figueroa Cobar, Ó. R., Flores Soto, J. A., & Vargas Miranda, J. M. (2020). Propuesta de implementación de RCM en sistema de separación y reinyección de agua en una central geotérmica de El Salvador. *Investigaciones UCA*, 380-383. <https://doi.org/10.51378/iuca.v1i1.6835>
- Gardella Gonzales, Marc. (2011). *MEJORA DE METODOLOGÍA RCM A PARTIR DEL AMFEC E IMPLANTACIÓN DE.pdf*.
- Mantenimiento estratégico*. (s. f.).
- Moubray, J. (1997). *MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD*.
- Quintero. (2021). *DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM) PARA EL SISTEMA DE BOMBEO DE LA EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICO DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE GAMARRA CESAR, EMPUGAM S.A.S.*
- Rangel, H. O. S. (2021). *PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD (RCM) PARA LOS EQUIPOS DE TIPO ROTATIVO DEL PROCESO "SISTEMA DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN (STAP 6)" EN LA PLANTA "ESTACIÓN CASTILLA 3 (EC3)" DE LA EMPRESA ECOPETROL S.A.*
- Rodríguez, I. R. (s. f.). *ING. ROSELIA RODRIGUEZ*.

SAE. (2002). *SAE\_JA\_1012.pdf*. SAE.

Zamora Parra, B., & Viedma Robles, A. (2016). *Máquinas hidráulicas: Teoría y problemas*.

Universidad Politécnica de Cartagena. <https://doi.org/10.31428/10317/5476>