

**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA
CONFIABILIDAD**

Propuesta de un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad del Equipo Más Crítico en la Estación de Bombeo de Agua Potable Cantalejo del Acueducto de Bogotá

Luis Ángel Guzmán Rodríguez

Eduar Javier Saiz Veloza

Departamento de Posgrados, Universidad ECCI

**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA
CONFIABILIDAD**

Propuesta de un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad del Equipo Más
Crítico en la Estación de Bombeo de Agua Potable Cantalejo del Acueducto de Bogotá

Luis Ángel Guzmán Rodríguez Cod. 132986

Eduar Javier Saiz Veloza Cod. 49198

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

José Isaías Salas Hernández

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Departamento de Posgrados, Universidad ECCI

Tabla de Contenido

1	<i>Título</i> -----	12
2	<i>Problema de Investigación</i> -----	12
2.1	Descripción del Problema -----	12
2.2	Formulación del Problema -----	14
3	<i>Objetivos</i> -----	16
3.1	Objetivo General -----	16
3.2	Objetivos Específicos -----	16
4	<i>Justificación y Delimitación</i> -----	17
4.1	Justificación -----	17
4.2	Delimitación -----	19
4.3	Limitaciones -----	19
5	<i>Marcos de Referencia</i> -----	20
5.1	Estado del Arte -----	20
5.1.1	Estado del Arte a Nivel Nacional-----	20
5.1.2	Estado del Arte a Nivel Internacional-----	27
5.2	Marco Teórico -----	30
5.2.1	Estructura de un Acueducto-----	31
5.2.2	Fundamentos de Mantenimiento-----	32
5.2.3	Objetivo del Mantenimiento-----	35
5.2.4	Análisis de Equipos-----	35
5.2.5	Tipos de Mantenimiento-----	38
5.2.6	Combinación de los Tipos de Mantenimiento-----	39
5.2.7	Metodologías de Mantenimiento-----	40
5.2.8	Mantenimiento Basado en la Condición (CBM)-----	41
5.2.9	Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)-----	41
5.2.10	Indicadores de Desempeño KPIs en Mantenimiento-----	47
5.2.11	Metodología de Predicción y Distribución Weibull para RCM-----	49
5.2.12	Análisis de Criticidad-----	50
5.2.13	Análisis de Pareto-----	52
5.2.14	Tipo de Investigación-----	53
5.3	Marco Legal -----	55
5.3.1	Constitución Política de Colombia-----	56
5.3.2	Leyes y Normativas Relacionadas con el Agua-----	56
5.3.3	Normativas de Mantenimiento y Seguridad-----	57
5.3.4	Normativas Laborales y de Seguridad Ocupacional-----	58
5.3.5	Normas EAAB - ESP-----	58
6	<i>Marco Metodológico de la Investigación</i> -----	60
6.1	Recolección de la Información -----	64
6.1.1	Fuentes Primarias de Información-----	65
6.1.2	Fuentes Secundarias de Información-----	65
6.1.3	Técnica de Recolección de Datos-----	66

6.2	Análisis de la Información	70
6.2.1	Análisis de la Encuesta para Medir la Satisfacción Frente a la Propuesta	71
6.2.2	Análisis de Datos de Fallas de los Equipos	72
6.2.3	Organización de los Datos de Fallas de los Equipos	73
6.2.4	Medición de Indicadores de Desempeño KPIs de los Equipos (Gestión de la Información de los Equipos)	76
6.2.5	Jerarquización de los Equipos	78
6.2.6	Análisis de Criticidad	80
7	Resultados	85
7.1	Resultados de la Encuesta	85
7.2	Análisis e Interpretación de los Resultados de la Encuesta	87
7.3	Resultados del Análisis CMD y AMEF	95
7.4	Análisis e Interpretación de los Resultados del PLC	101
7.5	Propuesta de Solución: Plan de Capacitación de Mantenimiento de RCM y Plan de Mantenimiento de RCM para el PLC	102
7.5.1	Plan de Capacitación de Mantenimiento de RCM	102
7.5.2	Propuesta de Solución: Plan de Mantenimiento de RCM para el PLC	105
8	Análisis Financiero	107
9	Conclusiones y Recomendaciones	109
9.1	Conclusiones	109
9.2	Recomendaciones	113
10	Referencias Bibliográficas	115
11	Apéndices	120
11.1	Apéndice A. Diseño de la Encuesta	120
11.2	Apéndice B. Recolección de los Datos de la Encuesta	122
11.3	Apéndice C. Taxonomía Equipos EBAP Cantalejo	124
11.4	Apéndice D. Datos de Fallas Equipos	124
11.5	Apéndice E. Organización de los Datos de los Equipos	125
11.6	Apéndice F. Medición de Indicadores de Desempeño KPIs de los Equipos	130
11.7	Apéndice G. Tablas para el Análisis de Criticidad	142
11.8	Apéndice H. Resultados Fiabilidad del Instrumento	144
11.9	Apéndice I. Estadística Descriptiva del Instrumento	146
11.10	Apéndice J. Diagramas de Gantt	151

Tabla de Tablas

Tabla 1 Normas técnicas de suministro (NT) (SISTEC EAAB, 2023).....	59
Tabla 2 Operacionalización de las variables (Fuente los Autores).....	61
Tabla 3 Población interesada de la propuesta de RCM (Fuente los autores).....	67
Tabla 4 Encuestados de acuerdo al cargo (Fuente los Autores).....	68
Tabla 5 Tabla de ítems de la encuesta de satisfacción realizada al personal de la DSE (Fuente los Autores)	71
Tabla 6 Datos de operación PLC de sistema de control y SCADA (Fuente los Autores).....	74
Tabla 7 Datos de falla PLC de sistema de control y SCADA (Fuente los Autores).....	74
Tabla 8 KPIs PLC de sistemas de control y SCADA (Fuente los Autores).....	76
Tabla 9 Taxonomía de equipos (Fuente los Autores).....	78
Tabla 10 Análisis modos de falla y efectos de falla del PLC (Fuente los Autores).....	83
Tabla 11 Magnitudes para evaluar la fiabilidad como resultado del alfa de Cronbach (Ruiz Bolívar, 2013)	86
Tabla 12 Resultados de la estadística descriptiva ítem 2 (Fuente los Autores).....	88
Tabla 13 Resultados de la estadística descriptiva ítem 8 (Fuente los Autores).....	89
Tabla 14 Resultados de la estadística descriptiva ítem 9 (Fuente los Autores).....	92
Tabla 15 Resultados de la estadística descriptiva ítem 10 (Fuente los Autores).....	93
Tabla 16 Confiabilidad y Mantenibilidad PLC de sistemas de control y SCADA (Fuente los Autores).....	95
Tabla 17 Tareas de mantenimiento para el PLC (Fuente los Autores).....	98
Tabla 18 Plan de Capacitación de Mantenimiento RCM (Fuente los Autores).....	102
Tabla 19 Análisis financiero de la propuesta de un Plan de Mantenimiento RCM para el PLC de la EBAP Cantalejo (Fuente los Autores).....	108

Tabla de Figuras

Figura 1 Niveles industriales y equipos (Fuente los Autores).....	37
Figura 2 Curva de Confiabilidad y Probabilidad de falla (Mora Gutiérrez, 2009).....	43
Figura 3 Curva de Mantenibilidad (Mora Gutiérrez, 2009).....	44
Figura 4 Diagrama de Pareto cantidad de fallas por sistema o equipo (Fuente los Autores).....	73
Figura 5 Taxonomía actual EAAB según ISO 1424 (Documentación File Server EAAB).....	78
Figura 6 Matriz de criticidad (Fuente los Autores).....	80
Figura 7 Resultados de la estadística descriptiva ítem 2 (Fuente los Autores).....	88
Figura 8 Resultados de la estadística descriptiva ítem 8 (Fuente los Autores).....	90
Figura 9 Resultados de la estadística descriptiva ítem 9 (Fuente los Autores).....	92
Figura 10 Resultados de la estadística descriptiva ítem 10 (Fuente los Autores).....	94
Figura 11 Confiabilidad $R(t)$ Vs Desconfiabilidad $F(t)$ del PLC de sistemas de control y SCADA (Fuente los Autores).....	97
Figura 12 Mantenibilidad $M(t)$ del PLC de sistemas de control y SCADA (Fuente los Autores).....	97
Figura 13 Tarea propuesta en una Orden de Trabajo de SAP PM para el PLC de Cantalejo (Fuente SAP PM).....	112

Tabla de Ecuaciones

Ecuación 1 <i>Tiempo Medio Entre Fallas MTBF (Montilla Montaña, 2019)</i>	43
Ecuación 2 <i>Tiempo Medio de Reparación MTTR (Montilla Montaña, 2019)</i>	44
Ecuación 3 <i>Disponibilidad (Knezevic, 1996)</i>	45
Ecuación 4 <i>Cumplimiento de la programación (García Garrido, 2003)</i>	48
Ecuación 5 <i>Porcentaje atención inmediata no programada (García Garrido, 2003)</i>	49
Ecuación 6 <i>Ecuación Coeficiente alfa de Cronbach (Ruiz Bolívar, 2013)</i>	86

Introducción

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB - ESP presta el servicio de agua potable en Bogotá y poblaciones aledañas, la infraestructura con la que se cuenta para poder prestar el servicio de agua es enorme, desde la captación hasta el tratamiento de aguas residuales, es normal pensar que solo se trata de tuberías y válvulas las que se encargan de transportar el agua, pero en realidad hay una gran infraestructura tecnológica detrás de la distribución del agua, en este caso se centrará el estudio en las Estaciones de Bombeo de Agua Potable denominadas EBAP las cuales se encargan de distribuir el líquido vital a los habitantes, para lograr este objetivo cada EBAP tiene sistemas de bombeo de acuerdo a la demanda de los barrios circundantes a la estación, los sistemas de bombeo poseen equipos y partes mecánicas, eléctricas y electrónicas que requieren de un mantenimiento especializado.

La Dirección de Servicio de Electromecánica DSE una división de la Gerencia de Tecnología de la EAAB es el área encargada de la manutención y perfecto funcionamiento de las EBAP, para cumplir con su objetivo la DSE cuenta con profesionales calificados y ha implementado modelos de gestión de mantenimiento a la medida del cumplimiento de las metas, pero los modelos de gestión establecido no tienen la capacidad de medir la Confiabilidad, Disponibilidad y la Mantenibilidad de los sistemas de bombeo, conceptos fundamentales para el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM, teniendo en cuenta que la EAAB - ESP cuenta con 33 EBAP se limitó el estudio solo a una estación y también se limitó el estudio a el equipo más crítico de esta estación.

Por los motivos expuestos anteriormente el propósito del estudio de este proyecto es presentar una propuesta de un Plan de Mantenimiento RCM del equipo más crítico en una EBAP y que en un futuro pueda servir como piloto para la implementación de RCM para todas las EBAP.

Estructura del proyecto: El presente proyecto se organiza por capítulos, título del proyecto; en la capítulo 2 se identifica el problema de investigación, se formula el problema y como resultado se plantea la pregunta de investigación; en el capítulo 3 se plantea el objetivo general basado en la formulación del problema, se plantean los objetivos específicos; en el capítulo 4 se realiza la justificación del proyecto, la razón de la importancia de este, su delimitación y las limitaciones para realizarlo; en el capítulo 5 se realiza el marco de referencia para el proyecto que contiene el estado de arte, el marco teórico, el marco metodológico del proyecto que contiene el tipo de investigación, el diseño de esta, la recolección de la información, las técnicas de recolección y el análisis de la información; en el capítulo 7 se plasma los resultados del proyecto, se analizan los datos, se discuten estos y se presenta una propuesta de solución para cumplir con los objetivos propuestos; en el capítulo 8 se realiza el análisis financiero para determinar la rentabilidad del proyecto; en el capítulo 9 se plantean las conclusiones de los objetivos y se dan recomendaciones; en el capítulo 10 se listan la referencias bibliográficas para dar crédito a las fuentes citadas en el proyecto; en el capítulo 11 se listan los apéndices como tablas y figuras que sirven como apoyo al proyecto.

Resumen

El marco de referencia del presente proyecto se basa en el paradigma positivista con un enfoque cuantitativo y el método para el análisis de los datos es descriptivo.

El objetivo del proyecto es presentar una propuesta de un Plan de Mantenimiento RCM para el equipo más crítico de la EBAP Cantalejo, como marco de referencia para lograr el objetivo se usó la filosofía RCM, se planteó como primera medida una encuesta de satisfacción al personal de la DSE, el resultado fue de 81% a favor del plan de mantenimiento, como propuesta de solución para los aspectos que generan confusión se realizará una capacitación virtual en RCM, el segundo aspecto para cumplir con el propósito del proyecto fue analizar los datos descargados de SAP PM de los equipos que presentaron fallas desde enero de 2021 a marzo de 2024 de la EBAP Cantalejo para identificar los sistemas o equipos con más fallas, de acuerdo al análisis se seleccionaron 4 equipos, a los equipos seleccionados se les realizó la taxonomía de acuerdo a la norma ISO 14224, después se realizó el análisis de criticidad que dio como resultado que el PLC es el equipo más crítico y con el AMEF se realizaron las acciones proactivas para diseñar el Plan de Mantenimiento de RCM del PLC, como último paso se realizó el análisis financiero de la capacitación y el plan de mantenimiento RCM que arrojó un 33% de retorno sobre la inversión en un año.

Palabras claves: Confiabilidad, Criticidad, Disponibilidad, Encuesta, Estación de Bombeo de Agua Potable EBAP, Indicadores de Rendimiento KPIs, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM, Mantenibilidad, Taxonomía.

Abstract

The reference framework of this project is based on the positivist paradigm with a quantitative approach and the method for data analysis is descriptive.

The objective of the project is to present a proposal for an RCM Maintenance Plan for the most critical equipment of the Cantalejo WBS, as a frame of reference to achieve the objective the RCM philosophy was used, a satisfaction survey to the DSE personnel was proposed as a first step, the result was 81% in favor of the maintenance plan, As a solution proposal for the aspects that generate confusion, a virtual training in RCM will be conducted. The second aspect to fulfill the purpose of the project was to analyze the data downloaded from SAP PM of the equipment that presented failures from January 2021 to March 2024 of the Cantalejo WBS to identify the systems or equipment with more failures, According to the analysis 4 equipments were selected, the selected equipments were taxonomized according to the ISO 14224 standard, then the criticality analysis was performed which resulted in the PLC being the most critical equipment and with the FEA the proactive actions were performed to design the PLC RCM Maintenance Plan, as a last step the financial analysis of the training and the RCM maintenance plan was performed which showed a 33% return on investment in one year.

Key words: Reliability, Criticality, Availability, Survey, Drinking Water Pumping Station EBAP, Performance Indicators KPIs, Reliability Centered Maintenance RCM, Maintainability, Taxonomy.

1 Título

Propuesta de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad del equipo más crítico en la estación de bombeo de agua potable Cantalejo del Acueducto de Bogotá.

2 Problema de Investigación

2.1 Descripción del Problema

El corazón de Bogotá fue testigo de la inauguración oficial del primer tramo de una tubería de hierro el 2 de julio de 1888. Desde entonces, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – Empresa de Servicios Públicos (EAAB – ESP) ha avanzado junto a la ciudad, aumentando la felicidad y la calidad de vida de sus habitantes.

Para mejorar la disponibilidad de agua en Bogotá, se llevaron a cabo investigaciones y se construyó la planta de tratamiento Tibitoc, que terminó en 1959 con una capacidad inicial de 3.5 metros cúbicos por segundo, las dos ampliaciones posteriores han aumentado la capacidad actual a 10.4 metros cúbicos por segundo, esta planta formó parte del primer sistema de gran envergadura de la ciudad, el agua se obtiene de la planta a través del proceso de bombeo del Río Bogotá. (Minotta Peñaloza y Peña Salinas, 2022)

Sistemas Modernos Acueducto. Debido al rápido crecimiento de la ciudad, la EAAB – ESP inició el proyecto Chingaza la construcción comenzó en 1972, en un principio, se construyó el embalse de Chuza, desde donde el agua se transporta a través de túneles hasta la Planta de Tratamiento Francisco Wiesner (también conocida como Planta El Sapo), situada en el valle del río Teusacá. El Embalse de San Rafael, que comenzó a funcionar en 1997, se integró al sistema Chingaza y tuvo una capacidad total de 75 millones

de metros cúbicos, el agua de San Rafael se envía a la Planta de Tratamiento Francisco Wiesner.

Sistemas Modernos Alcantarillado. La empresa desarrolló un plan maestro de alcantarillado desde la década de los 60, decidió mantener el sistema de alcantarillado combinado en la parte antigua de la ciudad y para futuros desarrollos, usar un sistema separado o semicombinado. (Minotta Peñaloza y Peña Salinas, 2022)

La Dirección de Servicios de Electromecánica (DSE) de la EAAB-ESP. Es una dependencia de la Gerencia de Tecnología, encargada de gestionar el mantenimiento de las Estaciones de Bombeo de Agua Potable (EBAP), Estaciones de Aguas Residuales (EBAR) y Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), se divide en tres áreas:

- División Logística de Mantenimiento: Proceso de contratación y consecución de repuestos.
- División Táctica de Mantenimiento: Encargada de Mantenimiento Basado en la Condición (CBM), taxonomía, planificación y programación de actividades para los grupos de ejecución.
- División Ejecución de Mantenimiento: Encargada de realizar actividades de mantenimiento.

Las estrategias de mantenimiento implementadas actualmente en la DSE son:

- Plan den Mantenimiento Optimizado (PMO).
- Plan CBM.
- Plan de inspección / revisión.

Estas actividades de mantenimiento son ejecutadas por cuatro grupos de la División de Ejecución:

- Mecánica
- Eléctrica
- Electrónica
- Inspección y Revisión

Las actividades de mantenimiento preventivo tienen una hoja de ruta (tiempos de actividad por cada mantenimiento preventivo) ya definida en el PMO, en el caso del mantenimiento correctivo no se tiene un tiempo establecido para cada actividad, es necesario promediar el tiempo dependiendo de los fallos, teniendo en cuenta estos factores se planifica y se programa las actividades para la División de Ejecución, la planificación y la programación están a cargo de la División Táctica que tiene un planificador y 3 programadores para los grupos Eléctrico, Electrónico y Mecánico.

2.2 Formulación del Problema

Hay 3 factores que afectan la ejecución de las actividades programadas de cada especialidad:

Fallas Críticas de las Unidades de Bombeo. Las Unidades de Bombeo son los activos más importantes para la DSE y que requieren atención inmediata si presentan un fallo, esto es debido a que son vitales para la prestación del servicio de agua y para evitar inundaciones o rebose de aguas residuales.

Fallos Reiterativos del Sistema de Telecomunicaciones de las Estaciones. El sistema de telecomunicaciones es el factor principal de los fallos recurrentes en el grupo electrónico y que “rompe la programación de las actividades planeadas”, los fallos reiterativos de la red de telecomunicaciones son debido a la obsolescencia tecnológica de este.

Falencia del SCADA para Discriminar Tipos de Falla.

Supervisory Control And Data Acquisition (Control Supervisor y Adquisición de Datos), el sistema visualiza las Unidades de Bombeo y la Instrumentación de cada EBAP y EBAR, pero en el momento de un fallo no tiene la capacidad de interpretar que tipo de fallo es, si es de carácter eléctrico, electrónico o mecánico, la decisión para enviar la comisión idónea es de los Ingenieros de Centro de Control, al ser un sistema que depende de las comunicaciones y de la instrumentación, afecta en mayor medida al grupo electrónico.

Las estrategias de mantenimiento implementadas no tienen la capacidad de evaluar que acciones se pueden tomar para evitar los fallos reiterativos o críticos, los dos primeros factores no se pueden evaluar mediante el PMO y el CBM para poder tomar decisiones para evitar el incumplimiento de las actividades de mantenimiento programadas.

La EAAB-ESP cuenta con 33 EBAP, 19 Estructuras de Control, 20 EBAR y 55 tanques de almacenamiento, 3 PCH, 2 Planta de Tratamiento Agua Potable (PTAB) y 2 Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), una infraestructura muy grande, por esta razón se realizara la propuesta de un plan Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) en la EBAP Cantalejo.

De acuerdo con la formulación del problema se puede plantear la siguiente pregunta:

¿ Cómo diseñar una propuesta de un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para el sistema o equipo más crítico en la estación de bombeo de agua potable Cantalejo del Acueducto de Bogotá?

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Presentar una propuesta de un Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM para el sistema o equipo más crítico en la Estación de Bombeo de Agua Potable EBAP Cantalejo de la EAAB -ESP.

3.2 Objetivos Específicos

1. Identificar los sistemas o equipos con más fallas reiterativas en la EBAP Cantalejo.
2. Jerarquizar los sistemas o equipos con más fallas reiterativas en la EBAP Cantalejo.
3. Calcular la criticidad de los sistemas o equipos identificados con más fallas.
4. Realizar análisis de Modos de falla y Efectos de falla (AMEF) al sistema o equipo más crítico.
5. Diseñar un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM de acuerdo a las tareas que resultaron del AMEF del sistema o equipo más crítico.

4 Justificación y Delimitación

4.1 Justificación

La EAAB-ESP al ser una empresa estatal y prestar un servicio vital como lo es el agua potable para la ciudad de Bogotá debe asegurar y garantizar el recurso casi que ininterrumpidamente, ya que el agua no puede faltar en la comunidad por un tiempo mayor a 3 días, para ello la EAAB-ESP debe ser muy efectiva en los mantenimientos planeados en las más de 130 estaciones que se encuentran en la ciudad.

Por lo tanto, el diseño de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) presentado en este proyecto se justifica basada en los siguientes argumentos:

Necesidad de Mantenimiento Efectivo. Las Unidades de Bombeo en la DSE de la EAAB-ESP desempeñan un papel fundamental en la operación de la entidad, cualquier interrupción no planificada puede tener un impacto negativo en la prestación de servicios esenciales, como el suministro de agua y alcantarillado, por lo tanto, es esencial contar con una estrategia de mantenimiento RCM para garantizar su funcionamiento continuo y confiable.

Optimización de Recursos. La implementación de un mantenimiento centrado en la confiabilidad puede ayudar a optimizar los recursos disponibles en lugar de realizar reparaciones costosas y urgentes después de que ocurra un fallo.

Reducción de Costos. La falta de mantenimiento adecuado puede resultar en gastos significativos en reparaciones de emergencia, reemplazo de equipos y pérdida de ingresos debido a tiempos de inactividad, un enfoque centrado en la confiabilidad puede contribuir a

reducir estos costos, lo que tiene un impacto directo en la eficiencia operativa y en la gestión financiera de la EAAB-ESP.

Mejora en la Calidad del Servicio. Garantizar la disponibilidad de los equipos críticos mejora la calidad de los servicios que la EAAB-ESP, esto contribuye a la satisfacción del cliente y a la reputación de la entidad.

Cumplimiento de Normativas. Muchas regulaciones y estándares exigen la implementación de prácticas de RCM para garantizar la seguridad y la fiabilidad de las infraestructuras críticas, por esto es necesario un proyecto de investigación que diseñe una propuesta de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad en la estación de bombeo de agua potable Cantalejo de la EAAB -ESP.

Innovación y Desarrollo. Diseñar un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad requerir la adopción de tecnologías avanzadas, enfoques novedosos y mejores prácticas, esto fomenta la innovación y el desarrollo en el campo de la electromecánica y puede tener aplicaciones más amplias en otros sectores.

En resumen, la justificación de este proyecto de investigación radica en la necesidad de mantener operativos los equipos esenciales de la EAAB-ESP, lo que a su vez tiene un impacto significativo en la eficiencia operativa, la gestión de costos, la calidad del servicio y el cumplimiento de regulaciones.

El diseño de un plan de mantenimiento RCM es esencial para abordar estas necesidades y desafíos de manera integral.

4.2 Delimitación

El presente proyecto inicialmente se delimita a la ciudad de Bogotá y más específicamente al EBAP Cantalejo, el tiempo de para realizar la propuesta es hasta el 30 de mayo de 2024.

4.3 Limitaciones

Los componentes o barreras que pueden influir en el alcance, los resultados y el diseño del proyecto son sus limitaciones. Determinar y comprender estas limitaciones es esencial para formular inferencias y evaluar imparcialmente los resultados del proyecto. El proyecto tiene varias limitaciones, entre ellas las siguientes:

Tiempo. La falta de tiempo podría limitar la recolección, la organización y la calidad de los datos necesarios para hacer los análisis pertinentes , lo que influye en el alcance y la profundización del proyecto.

Acceso a la Información. La privacidad y confidencialidad de ciertos datos puede afectar los resultados y análisis de los objetivos propuestos en el proyecto.

Infraestructura de la EAAB – ESP. La empresa cuenta con una gran cantidad de estaciones de bombeo, estructuras de control, tanques de almacenamiento y plantas de tratamiento, esta gran infraestructura limita el estudio base del proyecto y hace que la recolección de datos sea demasiado compleja.

Limitación de Equipos de Medición. No es posible verificar con equipos de medición los datos arrojados por el plan de mantenimiento predictivo o de CBM, porque no se cuentan con estos equipos.

5 Marcos de Referencia

5.1 Estado del Arte

5.1.1 *Estado del Arte a Nivel Nacional*

Propuesta de mejora de la Gestión de Mantenimiento de los activos de una Compañía Certificadoras de Productos y Servicios.

Geovanny Alexander Villanueva González, Andrés Fernando Naranjo Mateus, Edgar Jerez Romero, Universidad ECCI, 2021, el trabajo se centra en las formas de mejorar el proceso de gestión del mantenimiento. Para elegir la mejor metodología para la investigación, se realizó un diagnóstico preliminar y un análisis del procedimiento actual de la empresa. Se sugirió desarrollar un plan estratégico para abordar los problemas identificados durante el análisis de la información una vez finalizada la evaluación. Los pilares de la gestión, como el capital humano, los clientes internos, la planificación, los contratistas, la gestión de recambios, las áreas interfuncionales internas y el control de costes, se forman dentro del marco de desarrollo y se apoyan en indicadores para garantizar la consecución de los objetivos establecidos. Del anterior proyecto se tendrá en cuenta el plan de gestión aplicado como ayuda para diseñar el plan de mantenimiento RCM de la presente propuesta. (Villanueva González, Naranjo Mateus y Jerez Romero, 2021)

Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo para la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Cogua Cundinamarca caso de estudio: cámara de vacío.

Andrés Heladio Rodríguez Azuero, Henry Alejandro Cubillos Forero, José Alberto Muñoz Calvo, Universidad ECCI, 2019, como resultado del reconocimiento de la importancia de mantener adecuadamente los equipos para prolongar su vida útil y evitar su

depreciación, muchas organizaciones aceptan ahora más los gastos de mantenimiento. El objetivo específico es implementar un software que gestione los planes de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos de la cámara de vacío una PTAP. Cuando se redactó inicialmente el plan del proyecto, este equipo no estaba en uso, pero mediante un análisis, se determinó que su sustitución era innecesaria. Este proyecto sirve como guía para el análisis de las "causas de fallo" del equipo más crítico de la presente propuesta. (Rodríguez Azuero, Cubillos Forero y Muñoz Calvo, 2019)

Diseño de un plan de mantenimiento con metodología AMEF y CMD para los equipos electromecánicos críticos de la estación elevadora "la isla" de la empresa de acueducto y alcantarillados de Bogotá – EAAB ESP.

Luis Hernando Laguna Garzón, Universidad Industrial de Santander, 2022, este proyecto, que establece las obligaciones de mantenimiento de los equipos electromecánicos de la estación de bombeo "La Isla" de la EAAB ESP, se basa en el enfoque sistemático kantiano, para ello, se miden los parámetros CMD y se realiza un análisis de fallos mediante la metodología AMEF. El objetivo es aumentar la fiabilidad en un 70-80% aplicando los procedimientos de mantenimiento preventivo adecuados. Tras utilizar el diagrama de Pareto, se realizará un Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF) para identificar los componentes electromecánicos de la estación de bombeo "La Isla" que representan el 80% del tiempo de reparación (MTTR) y del número de fallos. Este proyecto sirve como base fundamental para identificar los modos de falla del equipo más crítico mediante la metodología de AMEF (Análisis de Modos y Efectos de falla). (Laguna Garzón, 2022)

Aplicación de metodología de AMEF en mantenimiento de prensa hidráulica para ensamble de ejes pesados en ZOFICOL.

Wilmer Barreto Santos, Jeison Molina Hernández, Bladimir González Cuadrado, Universidad ECCI, 2018, el objetivo de este estudio era recopilar información para proponer un plan de mantenimiento para el departamento encargado de esta labor, que ayude a analizar el mantenimiento del sistema hidráulico de la prensa COHA con referencia a la PT 50E, que se utiliza para crear cojinetes para ejes de camiones. Este estudio se centró en el proceso de producción de Zona Franca Industrial Colmotores ZOFICOL SAS. Se cita este proyecto para conceptualizar la “Definición de RCM”. (Barreto Santos, Molina Hernández y González Cuadrado, 2018)

Elaboración de propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para los componentes electromecánicos de la estación de bombeo San Dionisio y línea de impulsión Consuelo.

Michael Fernando Enciso Linares, Universidad Pontificia Bolivariana, 2022, este documento presenta un análisis realizado a la EAAB – ESP que suministrar agua potable a la ciudad de Bogotá, D.C. La empresa utiliza la tecnología de estaciones de bombeo electromecánicas. Para identificar la estación de bombeo que tendrá el mayor impacto si no se presta el suministro de agua a la comunidad, se realiza un análisis de Pareto de 46 estaciones de bombeo. El segundo capítulo del análisis es la estrategia RCM que ofrece un desglose detallado de los componentes electromecánicos de la estación de bombeo seleccionada. Este proyecto sirve como guía para realizar el diagrama de Pareto para la seleccionar los equipos con más fallas, “análisis preliminar de criticidad de las estaciones de bombeo”. (Enciso Linares, 2022)

Metodología de gestión integral del riesgo para la dirección de servicios electromecánica de la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá ESP.

Carlos Iván Minotta Peñaloza, Néstor Iván Peña Salinas, Universidad Externado de Colombia, 2022, el objetivo del proyecto de fin de carrera es desarrollar una estrategia integral de gestión de riesgos para el Departamento de Mantenimiento Electromecánico (DSE) de la EAAB-ESP. La técnica sugiere pasos para su aplicación y se adhiere a las normas ISO 31000 e ISO 31010. La primera fase consiste en establecer el entorno del DSE, responsable del funcionamiento y mantenimiento de todas las estaciones de la EAAB-ESP, incluidas las estaciones de bombeo, las estructuras de control de presión y caudal, las pequeñas centrales hidroeléctricas, los depósitos de almacenamiento y las estaciones elevadoras de aguas residuales. La técnica "Y si...", que analiza los sucesos de riesgo (consecuencia, suceso, causa), se utiliza para concluir la fase de identificación de riesgos. Le siguen el análisis y la evaluación del riesgo, con la construcción de tablas de probabilidad e impacto basadas en los cinco criterios principales especificados. A continuación, la técnica pasa a la fase de evaluación en la que se llevan a cabo acciones según normas predeterminadas. El proceso finaliza con el seguimiento y la vigilancia de los riesgos. Este proyecto servirá como guía para realizar una vista general de la captación y prestación del servicio hídrico. (Minotta Peñaloza y Peña Salinas, 2022)

Propuesta de implementación paso 1 pilar de mantenimiento planeado basado en la metodología de mejoramiento continuo TPM mantenimiento productivo total en línea piloto calderas aceite térmico y vapor del área servicios industriales de la compañía Nacional de Chocolates fabrica Bogotá.

Hugo Ardila, Jhonatan Corchuelo, Fredy Montero, Universidad ECCI, 2022, la Compañía Nacional de Chocolate requiere una propuesta basada en la metodología de mejora continua TPM (Mantenimiento Productivo Total) para la implementación del paso 1 en el pilar de mantenimiento planificado. Actualmente, la empresa tiene problemas con la línea piloto, las calderas, el aceite térmico y el vapor industrial, que repercuten directamente en la fiabilidad y disponibilidad de los equipos, lo que provoca una reducción de la productividad prevista y pérdidas económicas. Para lograr la aplicación del paso 1, se han establecido los siguientes objetivos: aplicar la metodología de la matriz de criticidad, establecer los principios de funcionamiento de los equipos, sugerir planes de mantenimiento y crear registros técnicos de los equipos. Para llevar a cabo esta investigación, se han recopilado los siguientes datos, tanto internos como externos: manuales de funcionamiento de los equipos, currículos, informes SAP, informes de mantenimiento, tiempo de trabajo de los equipos, etc. El éxito de una empresa depende de minimizar las pérdidas financieras, salvaguardar la producción y mantener la eficacia operativa y de mantenimiento. Se tomará este proyecto como base para realizar la conceptualización de TPM para poder evaluar si esta técnica sirve como estrategia de mantenimiento. (Ardila Ávila, Corchuelo Mora y Montero Moyano, 2022)

Procedimiento para recalcular la frecuencia de mantenimiento preventivo en equipos médicos del hospital bosa segundo nivel E.S.E.

Cristian Enrique Arguello Trujillo, Ingrid Mercedes Cruz Bernal, Universidad ECCI, 2018, los dispositivos y equipos médicos tienen un impacto directo en la vida de las personas, los elevados costes de mantenimiento requieren una inversión sustancial, para garantizar que el equipo médico de un centro sanitario sea fiable y esté disponible para las

pruebas diagnósticas, el tratamiento y el seguimiento de los pacientes, es crucial contar con un programa de mantenimiento bien planificado y gestionado, un programa así también alarga la vida útil del equipo y reduce los costes de adquisición. Los componentes cruciales para planificar un programa de mantenimiento de la tecnología sanitaria incluyen un inventario técnico de los equipos actuales, los procedimientos de mantenimiento que se utilizarán y los recursos financieros, materiales y humanos disponibles para el programa. A finales de julio de 2016, se enfocó en la necesidad del “inventario técnico”, esta labor consiste en determinar las frecuencias de mantenimiento preventivo de los equipos médicos para desarrollar un programa de mantenimiento utilizando algunos de los equipos existentes en la segunda planta del Hospital de Bosa; para ello, se siguió el plan descrito en el programa de mantenimiento de equipos médicos de la Organización Mundial de la Salud, este modelo explica cómo priorizar las tareas de mantenimiento preventivo en función del riesgo y calcular su frecuencia. Este proyecto sirve de guía para analizar el “mantenimiento preventivo orientado al riesgo” y evaluarlo como estrategia de para nuestro proyecto.

(Arguello Trujillo y Cruz Bernal, 2018)

Diseño de un plan de mejora para el mantenimiento de la empresa Transportes Vigía, línea de vehículos Volkswagen.

Gustavo Rojas Rodríguez, Andrés Guillermo Posada Vargas, Universidad ECCI, 2023, la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) se utiliza para crear planes de mantenimiento que antepongan la satisfacción de los usuarios o propietarios y garanticen el buen funcionamiento de los activos, esta estrategia es aplicable a las flotas de vehículos de transporte terrestre, en las que métricas como la disponibilidad y el tiempo medio entre averías son esenciales, este proyecto trata de poner en marcha

prácticas de mantenimiento de flotas que den prioridad al aumento del kilometraje sin dejar de tener en cuenta las prácticas de mantenimiento preventivo, predictivo y de otro tipo existentes. Para maximizar los activos de la empresa, se hará hincapié en la organización periódica y en la aplicación del mantenimiento basado en RCM. Este proyecto servirá como guía para analizar la metodología RCM. (Rojas Rodríguez y Posada Vargas, 2022)

Propuesta de implementación de un modelo de mantenimiento basado en condición para equipos de aire acondicionado en sucursales bancarias de Norte de Santander.

Yordy Eduardo Rincón Vergel, Oscar Javier Rojas Fernández, Jonnathan Lozada Guiza, Universidad ECCI, 2018, el objetivo principal de este estudio es la aplicación de un programa de mantenimiento basado en la condición para abordar las dificultades de confort térmico a las que se enfrentan las sucursales bancarias de Cúcuta (Colombia). El calor extremo de la región repercute directamente en el estado de los activos y en la calidad del flujo. Dado que el confort térmico de las sucursales es crucial para el funcionamiento continuado del nodo informático, se diseñan métodos de mantenimiento específicos para abordar estos problemas, cuando el nodo informático falla, tiene un impacto significativo en la disponibilidad de la plataforma bancaria y provoca pérdidas financieras, es imperativo que estas sucursales bancarias reduzcan al mínimo el tiempo de inactividad no planificado para aumentar la disponibilidad y fiabilidad del equipo. Este proyecto servirá como guía para analizar la metodología CBM y evaluar si es posible realizar una acción de mejora como estrategia de mantenimiento. (Rincón Vergel, Rojas Fernández y Lozada Guiza, 2018)

5.1.2 Estado del Arte a Nivel Internacional

Diseño de un modelo de gestión de mantenimiento basado en la gestión del conocimiento para la dirección de sistemas de bombeo GAM del instituto costarricense de acueductos y alcantarillados.

Ariel García Rodríguez, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2018, aunque la gestión del mantenimiento es un tema crucial, a menudo el aspecto técnico tiene prioridad, este proyecto esboza un método para llevar a cabo el mantenimiento utilizando herramientas que los gestores o ingenieros de mantenimiento han pasado por alto, entre los recursos que suelen pasarse por alto están el conocimiento, el uso de datos y el conocimiento tácito, filtrando y analizando estos materiales, se puede aprender a anticipar los problemas, gestionar mejor las finanzas y realizar tareas que tengan un mayor impacto en la vida útil de los equipos. El objetivo de este proyecto es proporcionar una técnica para organizar la gestión del mantenimiento industrial que utilice el conocimiento como recurso principal. Este proyecto sirve como guía para la definición una estación de bombeo y sus principales componentes. (García Rodríguez, 2018)

Estudio de la base del mantenimiento y su influencia en la confiabilidad de las estaciones de bombeo poliducto Shushufindi – Quito en la empresa Petrocomercial filial de Petroecuador.

Edwin Marcelo Haro Villacís, Juan Francisco Correa Jácome, Universidad Técnica de Ambato, 2011, Para evaluar la necesidad de procedimientos adicionales, este proyecto examina las actividades de mantenimiento electromecánico en Petrocomercial, filial de Petroecuador. El efecto en las estaciones de bombeo del Oleoducto Shushufindi de Quito se analiza utilizando la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

Se utilizan encuestas, observación personal y publicaciones científicas para recopilar datos, el informe evalúa el proceso RCM y descubre los retos a los que se enfrenta Petrocomercial en el mantenimiento electromecánico, identifica la posición existente en la empresa, permitiendo la aplicación de medidas de confiabilidad para la maquinaria al establecer objetivos, políticas y anticiparse a los cambios del entorno, estos métodos pretenden mejorar la competencia y lograr el éxito en la calidad del servicio. Este proyecto servirá como base para describir los KPIs fundamentales para la DSE. (Haro Villacís y Correa Jácome, 2011)

Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema de bombeo de relaves de la Minera Chinalco Perú S.A.

Dick Jackson Delgado Bravo, 2023, Universidad Politécnica Amazónica, el objetivo del estudio era evaluar la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad del sistema de bombeo de relaves de Minera Chinalco Perú S.A. Se utilizó un diseño de investigación descriptivo directo y no experimental, junto con la teoría de distribución de Weibull, empleando un enfoque descriptivo básico. Durante el análisis, se identificaron los problemas del sistema de bombeo y se calculó la fiabilidad utilizando la duración operativa de las bombas, se determinó que la confiabilidad del sistema era del 89,74% a las 720 horas (1 mes) y del 82,34% a las 1420 horas (2 meses), utilizando el método de los mínimos cuadrados, cuando se analizaron los tiempos de reparación para evaluar la mantenibilidad, se calculó una vida útil del 83%, teniendo en cuenta la capacidad del sistema para reanudar el funcionamiento en 24 horas tras una avería, el último paso de la investigación consistió en calcular la disponibilidad inherente, que dio como resultado una disponibilidad del 99,84% para el sistema de bombeo de relaves, esto se consiguió dividiendo el tiempo medio

hasta el fallo (MTTF) por la suma del MTTF y el tiempo medio hasta la reparación (MTTR). Este proyecto servirá como guía para revisión teórica del método CMD (Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad). (Delgado Bravo, 2023)

Procedimiento para la gestión del mantenimiento eficiente en la UEB de Acueducto y Alcantarillado de Holguín.

Javier Alejandro Barrios Fernández, Universidad de Holguín, 2020, Con el objetivo de aumentar la productividad y reducir los residuos, este estudio pretendía analizar la gestión del mantenimiento en la Unidad de Negocio de Agua y Alcantarillado de Holguín (UEB). El objetivo era crear un sistema eficaz de gestión del mantenimiento para la UEB, antes de esbozar las tareas para abordar el problema planteado, la investigación recopiló primero información de referencia y evaluó el estado actual. Aplicando un enfoque de cinco fases y nueve pasos, se hizo posible la identificación de los residuos en las actividades de mantenimiento y la selección de las herramientas adecuadas para lograr los resultados deseados con unos insumos mínimos. Las medidas adoptadas incluían la reducción de la necesidad de mano de obra, piezas de repuesto, herramientas de mantenimiento y equipos. El objetivo era optimizar los procesos y recursos de mantenimiento para mejorar la eficacia general de la UEB mediante la aplicación de principios de gestión sólidos y la mejora continua. Este proyecto servirá como guía para analizar “las tendencias actuales de la gestión de mantenimiento” y evaluar si estas tendencias sirven como base para realizar una estrategia de mantenimiento efectiva para el grupo electrónico de la DSE. (Barrios Fernández, 2020)

Gestión de conservación en estaciones de bombeo de aguas residuales. Aplicación de la confiabilidad en el mantenimiento.

Claudia Alvarado Briones, Universidad Politécnica de Madrid, una estrategia de mantenimiento a largo plazo bien concebida debe planificarse cuidadosamente y financiarse adecuadamente. El mantenimiento es vital para la competitividad, ya que permite a las empresas alcanzar sus objetivos de productividad y calidad. Es esencial establecer políticas que permitan controlar las instalaciones y garantizar que los resultados se ajustan a las normas establecidas por la dirección de la empresa, aunque abordar los problemas cuando surgen puede proporcionar una solución rápida, no evitará que se repitan los errores, los equipos deben centrarse en identificar y resolver las causas subyacentes de los problemas. Este documento muestra cómo un enfoque predictivo de la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad puede ayudar a los responsables de mantenimiento a tomar decisiones informadas, destacando las oportunidades de mejora en componentes, maquinaria y sistemas. Este proyecto servirá para realizar la descripción de una estación de bombeo de aguas residuales EBAR. (Alvarado Briones, 2021)

5.2 Marco Teórico

Para una empresa con un departamento de mantenimiento, es crucial que esta área diseñe y evalúe constantemente estrategias de mantenimiento con el fin de emprender acciones de mejora. En este proyecto, se realizará un análisis para seleccionar la estrategia de mantenimiento más óptima para el grupo electrónico., para llegar a esta solución, es necesario basarse en fundamentos teóricos encontrados en libros, artículos acreditados, revistas científicas, a partir de estas fuentes, se investigarán temas como la estructura de un acueducto, herramientas gráficas como los diagramas de Pareto, la Taxonomía de Activos,

el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMEF), los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) centrados en el mantenimiento, la Criticidad de los Activos, la Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad, y estrategias de mantenimiento como el Mantenimiento Preventivo, el Mantenimiento Basado en el Condición (CBM), el Mantenimiento Correctivo Programado, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y el Mantenimiento Productivo Total (TPM).

5.2.1 Estructura de un Acueducto

Sistema Agua Potable. Los sistemas de acueductos constan de múltiples componentes que trabajan juntos para gestionar eficazmente los recursos hídricos. Estos componentes realizan tareas como recoger, transportar, tratar, almacenar y dispersar el agua.

Inicialmente, el agua se capta de diversas fuentes y luego se transporta por tuberías hasta los embalses para su almacenamiento. Después de purificarla en instalaciones de tratamiento, el agua se dirige a depósitos de almacenamiento y compensación. Por último, las estaciones de bombeo garantizan un suministro constante de agua potable a los hogares.

Este sistema es esencial para garantizar que los sistemas de agua potable sean fiables, duraderos, funcionales, técnicamente sólidos, eficientes y sostenibles.

Sistemas de Alcantarillados. Se denomina así al sistema de tuberías y construcciones destinadas a recoger, eliminar, transportar y evacuar las aguas residuales, ya sean procedentes de la actividad humana o de las precipitaciones.

De acuerdo a su procedencia hay tres tipos de alcantarillados:

Sanitario. Estructuras diseñadas con la intención de recoger, retirar, transferir y erradicar aguas residuales de hogares, negocios y microindustria. Es un sistema que debe ser bien proyectado, construido y mantenido, los sistemas sanitarios deben estar diseñados con una velocidad de arrastre adecuada para evitar sedimentos que provoquen gases mortales y corrosión de tuberías y equipos, es conveniente que se diseñe alcantarillado sanitario en lugares con pendiente, si no es posible es necesario diseñar estaciones de bombeo elevadoras.

Pluvial. Diseñado y construido para recibir, conducir y disponer aguas lluvias en cualquiera de sus formas (liquida, granizo o nieve), es necesario medir continuamente la cantidad de agua diariamente la cantidad de lluvia y registrar continuamente esta cantidad de agua en milímetros, estas mediciones se toman para el diseño inicial.

Combinado. Diseñado y construido para conducir aguas negras, industriales y lluvias, son sistemas poco usados, pero se pueden construir de acuerdo a los accidentes topográficos y la limitación de la población. (Pérez Carmona, 2013)

5.2.2 Fundamentos de Mantenimiento

Cada empresa requiere un servicio de mantenimiento a medida que se ajuste a su proceso de producción único, y ningún sistema utilizado en otra empresa puede modificarse sin hacer los ajustes necesarios específicos para los requisitos de cada empresa.

Además de las consideraciones técnicas, los factores de gestión y organización también deben tener en cuenta elementos económicos, de seguridad y medioambientales.

Un servicio de mantenimiento contemporáneo debe emplear técnicas de mejora continua que apoyen a la empresa en todas las etapas de su desarrollo y se ajusten automáticamente a cada fase de la existencia de la empresa, maximizando su rendimiento.

Dado que cada pieza de maquinaria y equipo experimenta una serie de degradaciones a lo largo de su vida útil, el mantenimiento es necesario. Si no se evitan o eliminan estas degradaciones, no se alcanzará plenamente el resultado esperado, se resentirá el rendimiento y se acortará la vida útil del equipo.

Esto implica que se necesitan trabajadores tanto para el manejo y manutención del equipo. Cuando la instalación se automatice, se necesitará menos mano de obra para producir más unidades, pero aumentará el número de componentes propensos a funcionar mal. Para garantizar un alto índice de utilización, es necesario un sistema de mantenimiento confiable.

A medida que el sector sigue creciendo, es evidente que se han adoptado diversos enfoques para abordar la cuestión del mantenimiento de las máquinas. Al principio, el usuario era el responsable del mantenimiento de las máquinas. Con una tecnología menos avanzada, las reparaciones sólo se llevaban a cabo después de una avería o justo antes de que estuviera a punto de producirse una. El operario de la máquina se encargaba de garantizar la producción y el buen funcionamiento. (Boero, 2017)

Cuando los equipos se hacían más complejos, los operarios necesitaban asistencia especializada para las reparaciones. En consecuencia, empezaron a surgir empresas o servicios dentro de la fábrica, estos talleres empleaban a personas con las habilidades y

herramientas necesarias para las reparaciones. Con el tiempo, estos talleres evolucionaron hasta convertirse en una función de servicio que se integró en la estructura organizativa de la empresa, esto debió a la expansión del tamaño de la industria y a la creciente necesidad de mantener el equipo en buenas condiciones para la producción.

Se hizo necesario diferenciar entre el personal de producción y el de mantenimiento. Como resultado, la participación del operario en las reparaciones disminuyó con el tiempo.

Como consecuencia de las dos guerras mundiales, el Servicio de Mantenimiento desempeñó un papel crucial para garantizar el rendimiento óptimo de la maquinaria de producción. Se estudiaron diversas fases del análisis de averías y sus soluciones, lo que dio lugar a importantes avances técnicos. Se encontraron correlaciones entre las horas de funcionamiento y la aparición de averías, lo que permitió realizar reparaciones antes de que se produjera el fallo. Empezaron a surgir distinciones entre las especialidades mecánicas y eléctricas dentro del personal de mantenimiento.

La evolución de la electrónica en los años 60 hizo necesario un cambio en el aspecto de las instalaciones. Esta nueva tecnología tuvo que integrarse en el mantenimiento con sus propias características. También influyó el desarrollo de nuevos métodos de reparación apoyados en herramientas y equipos más avanzados.

Los costes del servicio, a los que antes no se prestaba mucha atención, ahora debían ser tenidos en cuenta por Mantenimiento. Las técnicas debían ajustarse a los gastos implicados. Las organizaciones y los procesos de trabajo empezaron a estudiarse desde perspectivas tanto técnicas como económicas.

En la búsqueda de la mejora de la calidad, garantizar la seguridad de los empleados, influir positivamente en el medio ambiente y minimizar las pérdidas, el mantenimiento desempeña un papel crucial; va más allá de la mera reparación de averías en el momento, interviniendo activamente y contribuyendo significativamente al crecimiento de la industria. (Boero, 2017)

5.2.3 Objetivo del Mantenimiento

El objetivo del mantenimiento es alcanzar el máximo nivel de seguridad de los empleados, cumplir las normas de calidad exigidas, minimizar los costes y la degradación medioambiental, todo ello manteniendo la máxima Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad de los activos de una planta. (García Garrido, 2003)

5.2.4 Análisis de Equipos

La idea de que una planta debe recibir un único tipo de mantenimiento (preventivo, correctivo, etc.) ya no es válida. Cada equipo tiene una función específica dentro del proceso industrial y cualidades distintas que lo diferencian de los demás, incluso de equipos de tamaño similar. Esto implica que, mientras que un motor o una bomba puedan requerir un mantenimiento específico, otro similar puede requerir tareas totalmente distintas. Para mejorar los procesos de mantenimiento, no basta con tener en cuenta un patrón en el emplazamiento o las cualidades del equipo. Las mejores tareas de mantenimiento para cada equipo dependerá de una serie de factores que hay que tener en cuenta, como la repercusión en la seguridad, el coste del arreglo, el coste de una parada no programada de producción, etc.

Dicho de otro modo, antes de crear el plan de mantenimiento hay que realizar un importante trabajo preparatorio en una planta. enorme y muy significativo. Para determinar qué tareas son rentables y cuáles no, hay que examinar a fondo cada una de las piezas de maquinaria que componen la planta. Este trabajo puede parecer complejo en una planta con una cantidad de equipos considerable, pero no lo es. Un técnico debidamente formado puede necesitar de cuatro a seis semanas para completar este trabajo en una planta mediana con una cantidad menor a mil piezas de equipo. Mientras se realiza este análisis, se recopila una serie de datos adicionales, entre los que se incluyen:

- Información importante como Piezas de recambio y consumibles, tipo de actividades durante las paradas programadas, carga de trabajo estimada en Horas-Hombre, factores necesarios para elaborar el presupuesto anual de mantenimiento.
- Piezas de repuesto necesarias almacenadas en la fábrica.
- Ayudar a elaborar el programa de capacitación.
- Contratos con determinados productores de equipos. (García Garrido, 2003)

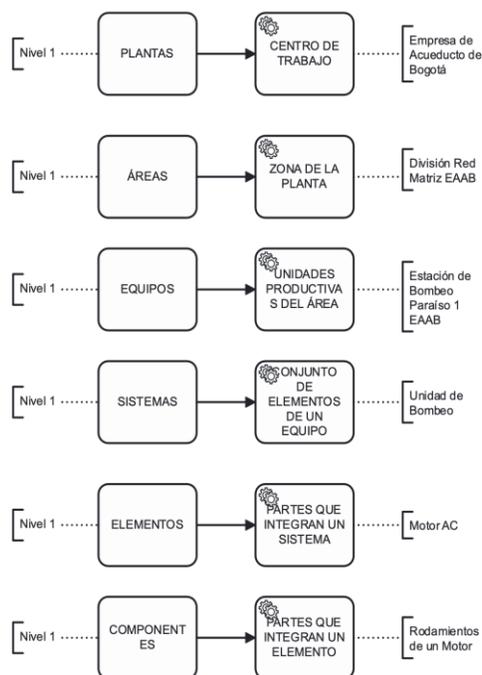
Listado de Equipos. El reto inicial al realizar el estudio de los componentes es crear un listado bien estructurado de todos los equipos de la planta. En un principio el inventario de los activos se puede ver sencillo pero es una actividad demandante.

Tener una lista básica de todos los activos de la planta como sensores, motores, bombas y otros, no es ni práctico ni útil. Una lista de este tipo no es información fiable; es solo una colección de información sin gestionar. Para crear un inventario de equipos realmente útil, se requiere una estructura de árbol que represente las interdependencias entre cada elemento de la lista y los demás.

Construyendo esta estructura de árbol, se podría localizar los distintos niveles de equipos dentro de una planta industrial. En la figura 1 se evidencia los distintos niveles expuestos anteriormente.

Figura 1

Niveles industriales y equipos (Fuente los Autores)



Nota. Los niveles industriales los sistemas y los equipos son importantes para poder realizar las ubicaciones técnicas y realizar la particiones de los sistemas, equipos y partes.

Una planta, empresa u organización puede tener uno o varias líneas de producción, cada una de ellas puede dividirse en varias líneas. Estas líneas pueden compartir similitudes en cuanto a sus líneas de productos, funciones o equipos. Cada uno de estos espacios consta de un conjunto distinto de equipos, idénticos o no. Cada equipo se divide a su vez en varios sistemas funcionales, cada uno de los cuales es responsable de una misión específica. Los sistemas contienen componentes (la bomba de un motor es un ejemplo de componente). Las

secciones más pequeñas de los elementos constituyen los componentes, que a menudo se sustituyen durante una reparación. (García Garrido, 2003)

Codificación de Equipos. Es esencial asignar un código único a cada equipo una vez realizada la lista de equipos, lo que simplifica el proceso de localizar el equipo, referenciarlo en órdenes de trabajo y planos, crear un registro histórico de errores y correcciones, calcular indicadores relacionados con áreas, equipos, sistemas, elementos y gestionar los gastos.

Fundamentalmente, hay dos opciones al momento de categorizar los equipos:

- Sistemas de codificación no significativos: Establecen un número o código correlativo al equipo, sin aportar otro dato.
- Sistemas de codificación significativa o inteligente: En esta opción código asignado va acompañado con otros datos relevantes. (García Garrido, 2003)

5.2.5 Tipos de Mantenimiento

A lo largo de la historia, se han identificado cinco categorías de mantenimiento, cada una de las cuales se distingue por los tipos de tareas que implica:

Mantenimiento Correctivo. Engloba un conjunto de tareas destinadas a resolver las averías que surgen en diversos equipos y que los usuarios comunican a la división de mantenimiento y pueden ser actividades programadas o no dependiendo de la criticidad del equipo.

Mantenimiento Preventivo. Su finalidad es mantener un determinado nivel de servicio en los equipos, programando correcciones puntuales en los factores vulnerables de los equipos.

Mantenimiento Predictivo. Es un método de mantenimiento que utiliza información relativa a valores variables específicos que sirven como indicadores del estado y la funcionalidad de un equipo, con el fin de supervisar e informar continuamente sobre su estado. Para ejecutar este tipo de mantenimiento, es esencial identificar las variables físicas (como la temperatura, las vibraciones, el consumo de energía, etc.) cuyas fluctuaciones indican posibles problemas con el equipo. Esta forma de mantenimiento es muy avanzada tecnológicamente, ya que requiere herramientas técnicas muy desarrolladas, así como una gran comprensión de las matemáticas, la física y los conocimientos técnicos. (García Garrido, 2003)

5.2.6 Combinación de los Tipos de Mantenimiento

El inconveniente de esta categorización de los tipos de mantenimiento es que cada equipo necesita una combinación de estos tipos; por tanto, no se puede confiar únicamente en utilizar uno de ellos para un equipo en concreto.

Por lo tanto, para un motor determinado, se realizará un mantenimiento preventivo periódico, se medirán las vibraciones o la temperatura, se realizará un mantenimiento predictivo (MP), posiblemente una revisión anual y reparar las averías que se produzcan (mantenimiento correctivo). Factores estrictos relacionados con el costo de las paradas en la producción por indisponibilidad del equipo, el coste de la reparación, el impacto en el

medio ambiente, la seguridad, determinarán la mejor combinación de todos estos tipos de mantenimiento.

La mencionada división se enfrenta al inconveniente de no poder dar una respuesta concluyente a la siguiente pregunta:

¿Qué nivel de mantenimiento debe llevarse a cabo en cada uno de los dispositivos que componen una planta?

Para responder a esta pregunta, resulta útil definir un modelo de mantenimiento. Un modelo de mantenimiento es una combinación de los tipos de mantenimiento mencionados, en cantidades específicas que se adapta a las necesidades de un equipo específico. Cada equipo requiere una combinación única de tareas y clases de mantenimiento, lo que significa que existen tantos modelos de mantenimiento como equipos. Sin embargo, esto no es del todo exacto. Es posible identificar cuatro combinaciones de este tipo, además de otras 2 clases de actividades. (García Garrido, 2003)

5.2.7 Metodologías de Mantenimiento

Son técnicas estructuradas y metódicas para gestionar y realizar reparaciones en instalaciones, maquinaria o sistemas, estas técnicas maximizan la longevidad, confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los activos, al tiempo que reducen los gastos y los riesgos.

5.2.8 *Mantenimiento Basado en la Condición (CBM)*

Este mantenimiento está basado en el estado de la máquina. El estado actual y pasado de la máquina afectan la decisión de realizar o no el mantenimiento, sin embargo, para medir los parámetros de una máquina, se requiere instrumentación adicional tales como: transductores, acondicionadores de señal, unidades de adquisición de datos, sistemas informáticos de análisis de señales y rutinas de diagnóstico basadas en software son ejemplos de esta instrumentación. Una vez que se conoce el estado de la máquina, resulta conveniente utilizar modelos matemáticos sencillos para determinar las razones de cualquier fallo inminente de la máquina o diagnosticar su estado de avería. Se puede realizar el pronóstico de averías y predecir la vida útil restante de la máquina con su estado actual una vez que los parámetros de estado de la máquina, tanto pasados como actuales, están disponibles en una base de datos.

La ventaja de esta técnica de mantenimiento es que el técnico puede saber en cualquier momento el estado de la máquina, lo que le permite determinar si es necesario repararla o no. Se ha demostrado en todo el mundo que, a largo plazo, el Mantenimiento Basado en la Condición es más económico que el preventivo, aunque al principio resulta costoso debido a la necesidad de un sistema de instrumentación adicional. (Ranjan Mohanty, 2015)

5.2.9 *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)*

Es una estrategia de mantenimiento que mejora la Confiabilidad operativa de un sistema que funciona en condiciones de trabajo definidas, basándose en la criticidad de los

activos y considerando los efectos potenciales de los modos de fallo sobre la seguridad, el medio ambiente o las operaciones.

En esta estrategia de mantenimiento, la atención se centra en la funcionalidad general del sistema y no en máquinas o equipos individuales; una máquina o un equipo no son esenciales, sino por el papel que desempeñan en el proceso de producción. La Confiabilidad es el término clave en RCM. (Montilla Montaña, 2019)

El RCM pretende identificar el estado crítico de los equipos de cualquier proceso y, basándose en este conocimiento, ayudar a las organizaciones a realizar un mantenimiento preventivo/predictivo.

Mientras que el RCM se centra en mantener la Confiabilidad de un proceso o equipo, el objetivo último del TPM es aumentar la productividad de una organización. Las empresas de élite han combinado eficazmente los dos enfoques, eliminando prácticamente las crisis y los fallos y cosechando al mismo tiempo los beneficios relacionados (aumento de la capacidad de producción, desarrollo de equipos, minimización de costes y mejora continua de los procesos).

5.2.9.1 Metodología Análisis de Modo y Efectos de Falla Basado en RCM.

Confiabilidad. Es la probabilidad de que un sistema o equipo no falle durante su funcionamiento o tenga interrupciones inesperadas. Como afecta directamente a la Disponibilidad operativa, la seguridad y la eficiencia del equipo, la Confiabilidad es un componente crucial de la gestión de activos y mantenimiento. Se mide tomando datos de del tiempo promedio entre fallas (MTBF). La ecuación del MTBF se describe en la

ecuación 1. La figura 2 muestra la curva característica de la Confiabilidad y la Desconfiabilidad.

Ecuación 1

Tiempo Medio Entre Fallas MTBF (Montilla Montaña, 2019)

$$MTBF = \frac{T_{OP}}{N_F}$$

Nota. Donde

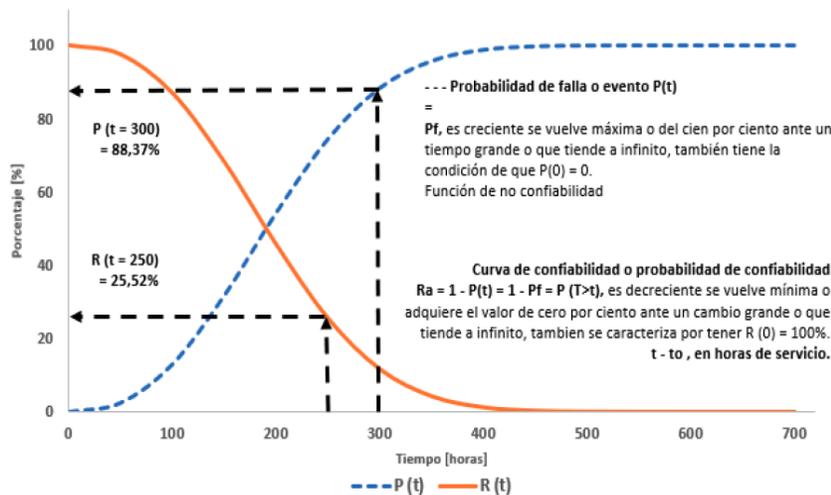
MTBF: Confiabilidad o Tiempo Medio Entre Fallas

T_{OP}: Tiempo total operativo

N_F: Número total de fallas

Figura 2

Curva de Confiabilidad y Probabilidad de falla (Mora Gutiérrez, 2009)



Nota. Es importante tener en cuenta que la curva de confiabilidad y la probabilidad de falla pueden variar según varios factores, como el diseño del sistema, las condiciones de operación, el mantenimiento preventivo, entre otros.

Mantenibilidad. Es una métrica que indica el tiempo promedio necesario para reparar un equipo o sistema después de una falla. Se mide tomando el tiempo medio de reparación (MTTR). La ecuación del MTTR se describe en la ecuación 2. La figura 3 muestra la curva característica de la Mantenibilidad.

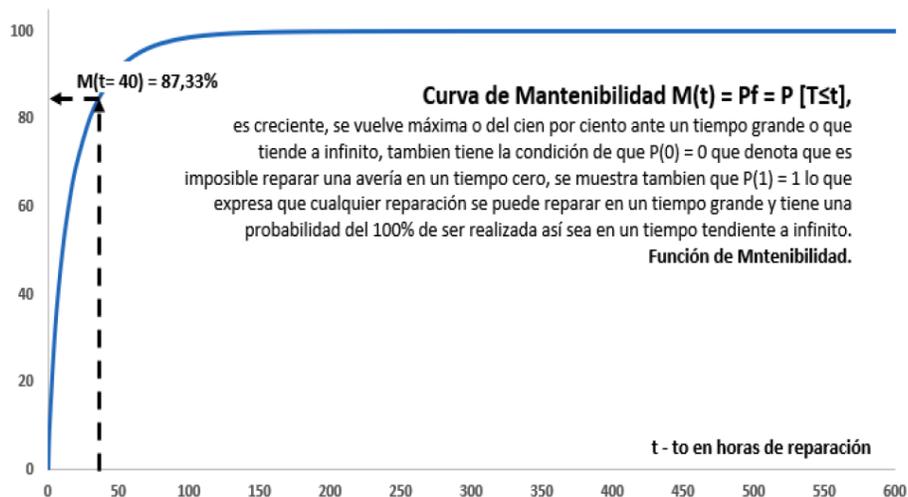
Ecuación 2

Tiempo Medio de Reparación MTTR (Montilla Montaña, 2019)

$$MTTR = \frac{T_{NOP}}{N_F}$$

Figura 3

Curva de Mantenibilidad (Mora Gutiérrez, 2009)



Nota. La curva de mantenibilidad es una herramienta valiosa para planificar estrategias de mantenimiento, asignar recursos de manera efectiva y optimizar el rendimiento del sistema a lo largo de su vida útil.

Disponibilidad. Una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un equipo es la disponibilidad, en casos en que la organización tenga que elegir entre varias opciones para comprar un equipo, es una medida muy importante y

útil. En la ecuación 3 se muestra la forma de medición de la Disponibilidad. (Knezevic, 1996)

Ecuación 3

Disponibilidad (Knezevic, 1996)

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Confiabilidad}}{\text{Confiabilidad} + \text{Mantenibilidad}}$$

Nota. Donde

MTTR: Mantenibilidad o Tiempo Medio de Reparación

T_{NOF}: Tiempo inoperación de la planta

N_F: Número total de fallas

Para mejorar la comprensión de una pieza, maquinaria o equipo, las definiciones de función, fallo potencial y funcional, modo de fallo, efecto y causa son inmensamente valiosas. También facilitan la identificación de los fallos del proceso y la mejora de la seguridad y funcionalidad del equipo.

Función. La razón subyacente a la compra de un componente, maquinaria o equipo. Cada contexto operativo específico debe tenerse definido. Es esencial representar el propósito de forma que permita cuantificar su pérdida. En otras palabras, el propósito debe representarse mediante variables de ingeniería específicas del entorno operativo examinado.

Falla Funcional (Crónicas). Un tipo concreto de avería o fallo que elimina por completo la capacidad de un componente físico para cumplir una norma de rendimiento exigida. En términos más sencillos, es el tipo de fallo en el que el equipo deja de funcionar por completo.

Falla Potencial (Esporádicas). Un tipo de fallo o mal funcionamiento, o signos físicos observables de que está a punto de producirse un fallo funcional. Estos errores quedan fuera o dentro de los parámetros que se han determinado para cada función.

Modo de Falla. Se pueden clasificar los modos de fallo como el detalle de cada uno de los fallos funcionales o fallos potenciales de equipos de instrumentación, mecánicos, eléctricos. Para evitar confundir un modo de fallo con un síntoma, la causa u origen del fallo debe ser evidente al definir el modo de fallo.

Efecto. Indicación producida por la posibilidad de un fallo funcional o potencial (ruido, vibración, fuga o goteo, aumento o disminución de la temperatura, etc.). (Montilla Montaña, 2019)

Causa. Es el proceso mediante el cual un componente específico de un sistema o proceso conduce a un modo de falla.

Consecuencia. Es el resultado desfavorable que afecta al usuario final (Cliente externo) o a un proceso productivo (Cliente interno). hay cuatro clases de consecuencias que toma en cuenta el RCM:

- *Consecuencias por fallas ocultas o no evidentes:* Evidenciar este tipo de fallas ayuda a reducir la probabilidad de someter a una organización a fallos con consecuencias graves y potencialmente catastróficas.
- *Consecuencia sobre la seguridad y el medio ambiente:* El RCM prioriza el impacto sobre las personas y el medio ambiente y están en primer lugar que cualquier otro impacto.

- *Consecuencias operacionales:* Se calcula las desventajas por daños en la producción (Total, calidad de la atención, extras a al arreglo rutinario de los equipos y maquinas.)
- *Consecuencias no operacionales:* Reparaciones rutinarias. (Montilla Montaña, 2019)

Gravedad de la Falla. Describe el impacto que tiene la fallo en el usuario o cliente.

La gravedad debe evaluarse en términos de productividad, daños al medio ambiente, seguridad industrial, daños a la propia máquina o equipo y calidad. Consecuencia y gravedad están estrechamente interconectadas.

Frecuencia. Es la factibilidad de que ocurra la falla. Si no se tiene las estadísticas de fallas, se debe conocer con bastante precisión el patrón de fallas del proceso, máquina, equipo o componente, así como la fase actual por la que atraviesa.

Detectabilidad. Muestra en qué medida pueden detectarse fácilmente las fallas en distintos subsistemas, piezas y componentes de la máquina/equipo.

5.2.10 Indicadores de Desempeño KPIs en Mantenimiento

Los Indicadores Clave de Rendimiento también conocidos como KPI, son métricas utilizadas para evaluar el desempeño de una empresa, proyecto o proceso en particular. Estos indicadores son cruciales para evaluar la eficacia de las estrategias implementadas y medir el progreso hacia los objetivos.

En el área de mantenimiento hay varios KPIs que ayudan a evaluar el desempeño de los equipos, del personal que realiza esta labor y de los costos de esta área.

5.2.10.1 KPIs de Gestión de Activos.

Disponibilidad. Indica cuándo un activo está operativo o tiene la capacidad de realizar su función. Es una evaluación de la capacidad del activo para operar cuando sea necesario.

MTBF (Mean Time to Failure). Consiste en calcular el tiempo total medio de funcionamiento de un equipo entre cada avería reparable. Esto lo convierte en una herramienta excelente para evaluar la Confiabilidad de los equipos.

MTTR (Mean Time to Repair). Tiempo medio reparación, es el tiempo que se tarda en reparar un componente o sistema tras un fallo, el objetivo de la Mantenibilidad es disminuir el MTTR mediante un diseño que simplifique el proceso de reparación.

MTTF (Mean Time to Failure). Es una métrica para calcular el tiempo previsto hasta el fallo de un sistema o componente no reparable. Es un indicador crucial para desarrollar y evaluar la Confiabilidad.

5.2.10.2 KPIs de Gestión de Órdenes de Trabajo.

Indicador de Asertividad de la Planificación. Porcentaje de todas las órdenes de trabajo ejecutadas en un tiempo determinado por el total de órdenes planificadas. Evalúa la calidad de la planificación y la programación. En la ecuación 4 se evidencia la métrica para la asertividad del planificación.

Ecuación 4

Cumplimiento de la programación (García Garrido, 2003)

$$\text{Cumplimiento Planificación} = \frac{\text{No. Órdenes Acabadas en la Fecha Programada}}{\text{No. Órdenes Totales}}$$

Indicador de Porcentaje de Tiempo no Programado por Trabajo de Emergencia (Atención Inmediata). La cantidad de OTs de emergencia producidas en un período de tiempo determinado es un indicador importante de la Confiabilidad de la planta. Si se han producido pocas o ninguna, la Confiabilidad de la planta es alta. Por otro lado, si se genera un gran número de OTs de máxima prioridad, es alta la Desconfiabilidad de la planta. Es fundamental observar la evolución de este indicador en comparación con épocas pasadas, como es habitual. La ecuación 5 muestra la métrica para este indicador.

Ecuación 5

Porcentaje atención inmediata no programada (García Garrido, 2003)

$$\text{Atención Inmediata} = \frac{\text{Horas O.T Prioridad Máxima}}{\text{Horas Totales de Mantenimiento}}$$

Indicador Backlog. En esencia, se trata de una lista de tareas de mantenimiento que aún no se han completado. Este trabajo atrasado podría incluir intervenciones preventivas, correctivas, predictivas y otras planificadas.

5.2.11 Metodología de Predicción y Distribución Weibull para RCM

Las métricas MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas), MTTF (Tiempo Medio Hasta la Falla), MTTR (Tiempo Medio de Reparación), se pueden predecir mediante el método gráfico de distribución Weibull que es una herramienta fundamental de en la Confiabilidad,

Mantenibilidad y Disponibilidad C.M.D, la predicción de estos datos se gestionan para evitar fallos recurrentes, paradas largas por reparación, gestionar metodologías de mantenimiento a ajustar le PMO (Plan de Mantenimiento Optimizado) si se tiene implementado; también sirve para determinar en qué fase de la vida útil se encuentra el equipo.

Con tres parámetros en su forma básica, la distribución de Weibull ofrece una gran flexibilidad y, mediante una cuidadosa selección y ajuste, permite producir mejores ajustes que con otras distribuciones.

- *Eta* (η): Define la vida útil de un equipo o sistema.
- *Gamma* (γ): Debido a que es el más difícil de estimar, con frecuencia se considera cero. Indica el período de tiempo en el que no hay posibilidad de error.
- *Beta* (β): Establece la forma de distribución de los datos y representa su dispersión.

El parámetro beta permite que la distribución de Weibull tome varias formas. Que permite evaluar en qué fase de la vida útil se encuentra el equipo o sistema, este análisis se basa en la curva de la bañera. (Mora Gutiérrez, 2009)

5.2.12 Análisis de Criticidad

Los activos en la industria no son todos igualmente importantes; algunos son más importantes que otros. Debido a la cantidad limitada de recursos disponibles para el mantenimiento de la planta, se debe concentrar la mayor parte de esos recursos en los equipos más cruciales y reservar una pequeña cantidad para los equipos que pueden tener un menor impacto en el desempeño de una compañía. Sin embargo, ¿cómo se pueden

discriminar los activos que poseen un impacto significativo en el desempeño de la compañía? Los esfuerzos para hacer esta distinción se basan en el análisis de criticidad de la maquinaria de la compañía. (García Garrido, 2003). Primero, se debe dividir la criticidad en diferentes niveles:

- A) *Activos críticos*: Aquellos cuya falla o parada afecta significativamente el rendimiento de la empresa.
- B) *Activos fundamentales*: Aquellos cuya falla, mal funcionamiento o parada tiene un impacto en el negocio, pero los costos son asumibles.
- C) *Activos prescindibles*: Aquellos que no tienen un impacto significativo en el resultado. Aproximadamente, la molestia será mínima, la modificación tendrá pocas repercusiones o el gasto aumentará ligeramente.

También se debe analizar el impacto de una falla en cuatro áreas clave: producción, calidad, mantenimiento y seguridad.

- *Producción*: Al evaluar el impacto de un equipo en la producción, se podría considerar cómo una falla podría afectarla. Se clasificara el equipo como A, B o C si la falla implica detener la producción por completo, detener un área de producción selecta, paralizar un equipo productivo pero con pérdidas de producción previstas o no tener ningún efecto.
- *Calidad*: El equipo puede tener un impacto significativo o inexistente o relativamente insignificante en la calidad del producto o servicio que se produce.

- *Mantenimiento*: El activo podría ser bastante errático y averiarse con frecuencia, valor de mantenimiento muy alto, o puede tener costos de mantenimiento moderados y fallar poco, o puede ser muy barato y crear problemas raramente.
- *Seguridad y medio ambiente*: El fallo de un equipo puede tener tres consecuencias: puede ser un accidente muy grave que ponga en peligro a las personas o el medio ambiente, o puede ser un fallo del equipo que tenga pocas posibilidades de provocar un accidente. Por último, puede tratarse de un fallo del equipo que no afecte a la seguridad. (García Garrido, 2003)

5.2.13 *Análisis de Pareto*

El economista y sociólogo italiano *Vilfredo Pareto* (1848-1923) aportó la metodología positivista a la sociología aplicando la formulación matemática a la teoría económica. En honor al economista Pareto, que realizó investigaciones sobre la distribución de la riqueza y descubrió que la mayoría de las personas poseía la parte más pequeña de la riqueza y la minoría la parte más grande, *Joseph Juran* bautizó el diagrama con el nombre de Diagrama de Pareto. Con él creó la llamada "Ley de Pareto", que afirma que la desigualdad económica es inevitable en cualquier comunidad.

Juran desarrolló lo que ahora se conoce como la regla 80/20 aplicando esta idea a la calidad. Esta idea establece que se puede argumentar que el 20% de las causas de un problema resuelven el 80% del problema, mientras que el 80% de las causas sólo resuelven el 20% del problema, si existen numerosas causas para el problema. Por consiguiente, un método para separar las "muchas triviales" de las "pocas vitales" es el análisis de Pareto. Un diagrama de Pareto ayuda gráficamente al equipo de trabajo de mantenimiento a

determinar dónde centrar sus esfuerzos de mejora separando visualmente los componentes importantes de un problema de los que no lo son (pocos importantes, muchos triviales).

(Montilla Montaña, 2019)

5.2.14 Tipo de Investigación

Investigar un fenómeno o problema implica una serie de procesos sistemáticos, críticos y empíricos.

Paradigma de Investigación. Se refiere a la forma en que se aborda el problema de investigación. Por lo tanto, la definición más amplia de paradigma es un conjunto de normas y métodos que cumplen dos objetivos: (a) determinar o fijar límites; y (b) señalar cómo proceder para lograr el éxito dentro de esos límites. Los paradigmas científicos están formados en parte por esta definición. (Ruiz Bolívar, 2013)

Paradigma Positivista. Es una perspectiva epistemológica y metodológica que se basa en la deducción de que el conocimiento científico es el resultado de la experiencia a través de la observación y la experimentación objetiva de fenómenos naturales y sociales. Este enfoque se basa en la idea de que existen leyes universales y generales que pueden ayudarnos a comprender el mundo, y que el principal objetivo de la ciencia es descubrir y explicar dichas leyes.

El paradigma positivista fomenta el uso de métodos cuantitativos, como encuestas, experimentos y análisis estadísticos, en la investigación para recopilar y analizar datos de forma objetiva y sistemática. Se centra en generar hipótesis claras y comprobables, así como en recopilar pruebas empíricas para apoyar o refutar dichas hipótesis. (Ruiz Bolívar, 2013)

Enfoque Cuantitativo. Es un grupo de pasos que siguen una metodología que refleja el paradigma positivista. Los pasos a seguir para aplicar este enfoque son: (a) se estudian los hechos en dominios de las variables; (b) medir las variables con instrumentos válidos y confiables; (c) analizar los datos utilizando técnicas estadísticas; (d) organizar los resultados en gráficos y tablas; (e) ser metódico y evidenciable; (f) seguir un orden estricto en los procesos; (g) tomar acciones cruciales antes de recopilar los datos; (h) indaga en la descripción de las condiciones del estudio. Los métodos experimentales, descriptivos y correlacionales son los principales métodos de investigación cuantitativa. (Ruiz Bolívar, 2013)

Método Descriptivo. A partir de una perspectiva científica, describir algo significa proporcionar información sobre un hecho midiendo sus variables más importantes. Así pues, la finalidad de la investigación descriptiva es determinar las características de un hecho o fenómeno. Por tanto, nos muestra la situación concreta objeto de estudio y cómo se manifiesta. Los estudios descriptivos pretenden determinar las características cruciales de individuos, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se analice. Existen distintos enfoques para los estudios descriptivos, como los estudios de encuestas, los estudios de casos, los estudios de tendencias, los estudios transversales y los estudios longitudinales, entre otros. (Ruiz Bolívar, 2013)

Llevar a cabo un análisis descriptivo, debe seguir la siguiente metodología: (a) establecer el problema o las circunstancias del objeto de la investigación; (b) elegir una muestra de las partes interesadas; (c) usar instrumentos adecuado para la medición, como

encuestas, pruebas y escalas de estimación; (d) reproducir y estudiar los datos; y (e) describir el alcance de los resultados y proporcionar conclusiones. (Ruiz , Octubre 2013)

El método descriptivo es muy útil para conocer a fondo un fenómeno específico o para crear una base de datos para futuras investigaciones. Aunque no determina relaciones causales entre variables, proporciona información útil para la formulación de hipótesis y la planificación de estudios futuros.

Variable. En investigación, una variable es una característica, propiedad o atributo que se puede medir, observar o manipular. Las variables son esenciales para el proceso de investigación porque son los objetos de estudio que permiten al investigador analizar y comprender los fenómenos, las relaciones y los efectos involucrados en un estudio.

Se pueden clasificar en:

- *Variables independientes:* Son las que el investigador maneja o controla durante un estudio. Se consideran la causa o el factor que se cree que influye en otras variables del estudio. En un experimento, se manipula la variable independiente para determinar su impacto en la variable dependiente.
- *Variables dependientes:* Son las que están influenciadas por la variable independiente representa los resultados, efectos o respuestas del estudio.

5.3 Marco Legal

Para este marco legal sobre el tema del mantenimiento RCM en la EAAB - ESP, es importante considerar las leyes, regulaciones y normativas relacionadas con la gestión del agua, la infraestructura pública y las prácticas de mantenimiento en Colombia, igualmente

con la tecnología, la seguridad electrónica, la industria y el empleo. A continuación, proporciono un esbozo general del marco legal que podría aplicarse:

5.3.1 *Constitución Política de Colombia*

La Constitución establece el deber del Estado y de la sociedad de garantizar el acceso al agua potable como un derecho fundamental, al igual que se deben adoptar medidas para preservar los recursos hídricos y garantizar su uso sostenible, y también establece principios fundamentales relacionados con el desarrollo tecnológico y la protección del medio ambiente.

5.3.2 *Leyes y Normativas Relacionadas con el Agua*

- *Ley 99 de 1993*: Define el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece disposiciones para la gestión ambiental, incluida la protección de los recursos hídricos, por lo cual la propuesta aquí planteada pretende mejorar los indicadores de pérdidas reportados en la estación.
- *Ley 142 de 1994*: Regula los servicios públicos domiciliarios en Colombia, incluido el suministro de agua potable. Establece los deberes y derechos de los usuarios y define las responsabilidades de los prestadores de servicios, como responsables de la prestación del servicio esta propuesta va encaminada a Identificar las fallas más frecuentes en la estación seleccionada para así mismo proponer mejoras.
- *Ley 373 de 1997*: Define los principios y disposiciones para la gestión integral de los recursos hídricos, en la cual nos apoyamos para proponer mejoras que contribuyan a una mejor gestión del recurso.

- *Decreto 1076 de 2015*: Reglamenta el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, estableciendo normas técnicas y administrativas para la prestación de estos servicios, en la cual nos apoyamos para proponer mejoras que contribuyan a una mejor gestión del recurso.
- *Ley 1753 de 2015 Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 "Todos por un nuevo país"*: Define políticas y estrategias para el desarrollo tecnológico y la innovación en Colombia, lo que puede tener implicaciones en el mantenimiento electrónico, mediante la cual se basa esta propuesta de mantenimiento, ya que se deben utilizar e implementar las nuevas tecnologías en busca de mejorar el mantenimiento establecido.
- *Decreto 1078 de 2015 - Régimen de Control Interno de las Entidades del Estado*: Establece normas para el control interno en las entidades del Estado, incluidas aquellas relacionadas con mantenimiento electrónico en instituciones públicas, normas con las cuales se basa la implementación de este plan de mantenimiento propuesto.

5.3.3 Normativas de Mantenimiento y Seguridad

- *Normas Técnicas Colombianas (NTC)*: Establecen los requisitos técnicos para el mantenimiento de infraestructuras y equipos relacionados con el suministro de agua potable.
- *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*: Aplicable a la infraestructura eléctrica y electrónica utilizada en sistemas de agua potable,

incluyendo requisitos de seguridad y mantenimiento, con el cual rigen las intervenciones eléctricas y electrónicas en las estaciones del acueducto.

- *Norma ISO 14224*: Norma internacional que determina las bases para el levantamiento o toma de datos de mantenimiento y confiabilidad, durante el ciclo de vida de los equipos en todas las facilidades y operaciones. Mediante la cual se rige esta propuesta, ya que la mejora se debe comparar equitativamente con los indicadores de mantenimiento actuales.
- *Estándar SAE-JA 1011/1012*: Es el estándar que indica los 7 requisitos que una metodología debe cumplir para ser denominada RCM. La cual es enfocada al estudio de los modos y efectos de falla y la probabilidad e impacto que ocurran estos eventos para el negocio. Basados en el estándar se pretende proponer la mejora aquí descrita, sin obviar ninguno de los 7 requisitos del estándar.

5.3.4 Normativas Laborales y de Seguridad Ocupacional

Las disposiciones de seguridad laboral y ocupacional establecidas en la legislación colombiana deben ser aplicadas en todas las actividades de mantenimiento, incluido el mantenimiento RCM. Esto incluye la protección de los trabajadores, la prevención de accidentes y la gestión adecuada de riesgos, en donde se basa esta propuesta de plan de mantenimiento para una mejor eficiencia en el mantenimiento de la estación en mención.

5.3.5 Normas EAAB - ESP

La siguiente tabla especifica normas internas del acueducto de Bogotá que se relacionan con las actividades que realiza el personal de mantenimiento, por lo mismo a

medida que avanza su implementación se modifican en busca de la mejora de las mismas, y con las cuales se basa la propuesta expresada en este documento.

Normas Técnicas de Suministro (NT). Norma que establece términos para trabajadores del acueducto de Bogotá en labores técnicas, estas normas generalmente vienen acompañadas de su definición y, a veces, de notas explicativas, ilustraciones y ejemplos. En la tabla 1 se listan las normas más usadas en la Dirección de Servicio de Electromecánica DSE.

Tabla 1

Normas técnicas de suministro (NT) (SISTEC EAAB, 2023)

NOMBRE	CÓDIGO	VERSIÓN
EG-107	Cargue, retiro, transporte y disposición de materiales sobrantes	2,0
NS-100	Criterios para la evaluación de la conformidad de los productos que adquiere la EAAB-ESP	2
NS-108	Requisitos mínimos de seguridad y salud en el trabajo para el manejo de herramientas manuales	1,0
NS-111	Requisitos mínimos de seguridad y salud en el trabajo en espacios confinados	3,0
NS-121	Requisitos mínimos de seguridad y salud en el trabajo para el manejo de máquinas herramientas	1,0
NS-132	Requisitos mínimos de seguridad y salud en el trabajo para manejo adecuado de cargas físicas	1,0
NS-135	Requisitos mínimos de seguridad y salud en el trabajo para labores relacionadas con izaje	2,0
NT-002	Terminología de acueducto	0,2
NT-004	Equipos de instrumentación electrónica. Terminología	0,0
NT-006	Terminología de seguridad y salud en el trabajo	2,0
NT-007	Terminología de ingeniería eléctrica	0,0
NT-008	Terminología mecánica	1,0

Nota. Es primordial recalcar que las Normas Técnicas de Suministro pueden ser diseñadas por organizaciones nacionales, internacionales u otros sectores, dependiendo del contexto en el que se aplican su alcance y contenido pueden cambiar significativamente.

6 Marco Metodológico de la Investigación

En este capítulo se analiza el tipo de investigación, el diseño o las estrategias utilizadas, la variable, la población, las técnicas de recolección de datos, el procedimiento y el análisis de los datos. Cada uno de estos aspectos se describe en este capítulo para demostrar el rigor y la sistematización que dan a esta investigación su carácter científico. Es esencial para establecer la estructura y la orientación del estudio, así como para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados.

Tipo de Investigación. En este marco de referencia y cumpliendo con el objetivo del proyecto de “presentar una propuesta de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad en la estación de bombeo de agua potable Cantalejo de la EAAB -ESP” es necesario medir aspectos humanos como el nivel de conocimiento de la estrategia RCM, la disposición al cambio, adopción de nuevas tecnologías, capacitación, evaluación de desempeño y retroalimentación constate, y aspectos técnicos de mantenimiento inherentes a los equipos tales como, tiempo medio entre falla, tiempo medio de reparación, confiabilidad y disponibilidad, para cumplir estos propósitos se utilizara el paradigma positivista con un enfoque cuantitativo utilizando el método descriptivo.

Diseño de la Investigación. El diseño de la investigación es el método mediante el cual el investigador reúne la información necesaria para abordar cada uno de sus objetivos específicos. Se refiere a las estrategias o pasos que se dan para alcanzar los objetivos. Teniendo en cuenta este aspecto la investigación a realizar en este proyecto pretende recolectar información sobre el de conocimiento del plan de mantenimiento RCM al personal interesado (DSE) mediante una encuesta, para la adquisición de la información técnica se usara la base de datos de fallas de SAP de la EBAP Cantalejo entre enero de 2021 a abril de 2024 lo que hace que sea una investigación descriptiva de tipo longitudinal. Para el caso de este trabajo de investigación se identificaron las siguiente variables:

- *Variable independiente:* Confiabilidad de Equipos
- *Variable dependiente:* Plan de Mantenimiento RCM

Operacionalización de las Variables. El proceso de definir y especificar cómo se medirán y observarán las variables en un estudio de investigación se conoce como operacionalización de las variables. Es un escalón importante en el marco de referencia de la investigación porque suministra una base evidente y objetiva para la recopilación de datos y la estimación de los supuestos planteados. En la tabla 2 se especifica la operacionalización de las variable que son objeto de la propuesta.

Tabla 2

Operacionalización de las variables (Fuente los Autores)

Variable	Tipo	Dimensiones	Indicadores	Ítems
Confiabilidad de Equipos	Independiente	Tasa de fallas	Número de fallas por año por equipo	1,2,3,4

			Tiempo medio para	
		Mantenibilidad	reparaciones	5
			(MTTR)	
			Tiempo Medio	
		Confiabilidad	Entre Fallas	6
			(MTBF)	
			Porcentaje de	
		Disponibilidad	tiempo que los	
		de equipos	equipos están	7
			operativos frente al	
			tiempo total	
			Porcentaje de	
		Cumplimiento	actividades de	
		de actividades	mantenimiento	8
		de	terminadas	
		mantenimiento	exitosamente	
			semanalmente	
			Porcentaje de	
		Cumplimiento	del plan de	
	Dependiente	mantenimiento	efectividad de plan	9
		PMO	de mantenimiento	
			Horas de formación	
		Capacitación y	en RCM y	
		competencia	mantenimiento por	10
		del personal	empleado.	
			Evaluaciones de	
			competencia	

Nota. Se expresan las variables (dependiente e independiente), sus dimensiones (que se va a medir), los indicadores (como se va a medir) e ítems (preguntas de la encuesta), los indicadores que se

tomaron son fundamentales para realizar un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad de acuerdo a (García Garrido, 2003).

Definición de las Variables.

Confiabilidad de Equipos. La confiabilidad de un activo se define como la probabilidad de que realice apropiadamente la función para el que está diseñado en un entorno a lo largo de un periodo determinado.

Es importante recordar que esta definición incluye cuatro características distintivas que son: (1) probabilidad; (2) correcto funcionamiento; (3) valoración del entorno; (4) tiempo. Los cuatro son los aspectos más importantes de la confiabilidad.

Para medir la confiabilidad se usan modelos algebraicos, estos modelos tienen en cuenta de las cuatro características anteriores. (Nachlas, 1995)

Plan de Mantenimiento RCM. Documentación que comprende una serie de actividades de mantenimiento programado que se deben ejecutar en una empresa, organización o planta para garantizar la disponibilidad que se trazó como objetivo. La documentación está en constante cambio debido a los cambios que se producen en la empresa, organización o planta y a las mediciones (KPIs) realizadas por parte de la gerencia. (García Garrido, 2003)

La implementación y gestión del plan de mantenimiento requiere una serie de pasos: Fragmentar la planta en zonas o líneas, crear un listado de activos, dividirlos en sistemas y componentes, codificar y asignar el mejor modelo de mantenimiento que se adapte a las particularidades del activo, la importancia y función en la cadena productiva de la planta. El

Plan de Mantenimiento está incluido dentro de una listado de actividades. (García Garrido, 2003)

La presente propuesta para un plan de mantenimiento de RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad), Es una estrategia efectiva para crear un plan de mantenimiento y expone varias mejoras significativas ante otras estrategias:

- Mayor entendimiento en el funcionamiento de los activos.
- Evaluar las probabilidades de que un activo falle y desarrollar estrategias para evitar que sucedan, ya sean por acciones personales o por factores internos del equipo.
- Diseñar planes de Manenimiento Preventivo, Predictivo y Correctivo que garanticen la optima operación de los activos bajo los parametros indicados.

6.1 Recolección de la Información

Con el objetivo de conocer, comprender, describir, explicar o transformar la realidad, la investigación científica es un proceso sistemático de aproximación metódica. No se refiere a la simple recopilación de datos e información sobre un hecho o fenómeno sin planificación. (Ruiz Bolívar, 2013)

De acuerdo a Sampieri (2014) “La recolección de datos requiere la elaboración de un plan detallado de procedimientos que permita recopilar la información con un propósito específico” (p. 198).

6.1.1 Fuentes Primarias de Información

Las fuentes de información primarias contienen datos originales o información directa que no ha sido interpretada o filtrada por terceros. Por lo general, la investigación se fundamenta en estas fuentes.

- *Bases de datos de SAP PM que sirven para soportar la información como:* Datos de avería, tiempo medio entre falla (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR), identificar los equipos que más fallan, planes de mantenimiento y frecuencias de mantenimiento.
- *Encuesta de satisfacción de la propuesta:* para medir opiniones, comportamientos y comentario acerca de la propuesta de mantenimiento de RCM en la EBAP Cantalejo, importantes para evaluar la mejora continua del mantenimiento RCM.
- *SGO (Sistema de Gestión Operativo):* Soporte fundamental para analizar las Ordenes de Trabajo, de aquí se pueden extraer los datos que alimentan la información ingresada en cada aviso en SAP PM.

6.1.2 Fuentes Secundarias de Información

Las fuentes de datos secundarios obtienen su contenido de las fuentes primarias y se utilizan para análisis, interpretación o síntesis. Estas fuentes pueden ser útiles para contextualizar los datos primarios o lograr una comprensión más amplia de un tema.

- Planificación y programación de planes de mantenimiento, documentos que se encuentran disponibles en archivos de Excel que sirven para determinar que acciones de mejora se pueden realizar.

- Libros, proyectos de investigación y otras fuentes de información relacionadas con el estudio de esta investigación que sirven para dar un carácter científico e investigativo a este proyecto.

6.1.3 Técnica de Recolección de Datos

Se debe tener en cuenta que para la presenta propuesta se tiene que recolectar datos de la satisfacción del personal de la DSE frente a un plan de mantenimiento RCM en la EBAP Cantalejo y datos técnicos de los equipos para analizar la Confiabilidad de estos, por esta razón se deben usar dos técnicas para recopilar estos datos.

6.1.3.1 Encuesta para Medir Satisfacción Frente a la Propuesta.

La técnica escogida para recolectar los datos de satisfacción del personal de la DSE frente a la propuesta es la encuesta con preguntas cerradas, en este tipo de encuestas los participantes (muestra) tienen que escoger una respuesta concreta de una lista de opciones determinadas. Es ampliamente usada para adquirir datos cuantitativos, y son útiles para recopilar información estructurada y de fácil análisis.

De acuerdo al concepto de Ruiz (2013) “en las ciencias de la educación, los instrumentos de medición son procedimientos claramente definidos y normalizados que admiten observar la conducta humana para desarrollar conclusiones sobre atributos específicos, rasgos, constructos o dimensiones” (p. 41), de acuerdo a esta definición, como instrumento de medición para recopilar los datos de la encuesta se aplicara la escala de estimación Likert. La escala Likert se fundamenta en una serie de afirmaciones o

enunciados a los que los encuentros responden señalando su grado de acuerdo o desacuerdo en una escala que va desde "totalmente en desacuerdo" hasta "totalmente de acuerdo".

Diseño de la Encuesta. Se formularon 11 preguntas (ítems), las 3 primeras preguntas están enfocadas en la percepción que tiene el personal de la DSE respecto a la adopción de nuevas estrategias y tecnologías para la gestión del mantenimiento, las preguntas restantes se enfocaron en la filosofía del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM y sus aspectos técnicos. En el apéndice A se muestra el diseño realizado de la encuesta.

Selección de la Población. Después de elegir la unidad de muestreo o análisis, es necesario determinar la población que se va a estudiar y la población a la que se desean aplicar los descubrimientos. En consecuencia, una población es el conjunto de todos los casos que cumplen con una serie de especificaciones. (Sampieri, 2014)

La propuesta de un plan de mantenimiento de RCM se limitó geográficamente a la EBAP Cantalejo para evitar la complejidad del análisis, también se debe limitar la población que se debe estudiar, para ello se seleccionó las parte interesadas del presente proyecto en esta caso sería el personal de la DSE. En la tabla 3 se muestra las partes interesadas para la presente propuesta.

Tabla 3

Población interesada de la propuesta de RCM (Fuente los autores)

Población	Cantidad
Director de la DSE	1

Jefes de División	3
Coordinadores de Mantenimiento	3
Personal Táctica	16
Personal Ejecución	20
Personal Logística	6
Total	49

Nota. Para obtener resultados representativos y generalizados se toma una muestra de la población seleccionada de la Dirección de Servicios de Electromecánica y se discrimina la población por el cargo laboral.

Muestra Poblacional. Para el caso de la presente propuesta la muestra es igual a la población es decir 49 encuestados. En la tabla 4 se discrimina la población que realizó la encuesta de acuerdo a las divisiones de la Dirección de Servicios de Electromecánica.

Tabla 4

Encuestados de acuerdo al cargo (Fuente los Autores)

Cargo	División	No. Cargos
Documentadora de Mantenimiento	Táctica	2
Ingeniero de Mantenimiento	Ejecución	2
Jefe de División Táctica de Mantenimiento	Táctica	1
Planificadora SAP PM MM	Táctica	1
Profesional Especializado	Ejecución	3
Programadora SAP PM MM	Táctica	3
Supervisor Contratos	Logística	5
Técnico Administrativo	Táctica	2
Técnico Operativo	Ejecución	10
Tecnólogo Operativo	Ejecución	6
Total Encuestados		35
Total Cargos		10

Nota. Es importante discriminar los cargos para analizar los datos y saber con facilidad que acciones o estrategias se pueden tomar para el personal que está inconforme con la propuesta de un mantenimiento de RCM. La recolección de datos de la encuesta se encuentran en el apéndice B.

6.1.3.2 Recolección de Datos de los Equipos.

Para poder llevar a cabo los objetivos de la presente propuesta es necesario recolectar los datos técnicos de los equipos de la EBAP Cantalejo, una actividad fundamental para poder analizar la Confiabilidad de estos y poder realizar un plan de mantenimiento de RCM, la recopilación de esta información se debe hacer de forma sistemática.

Método de Recolección de Datos. Toda la recopilación de datos para analizar la Confiabilidad de los equipos se hizo a través de la data de SAP PM esta base de datos se descargó mediante hojas de cálculo de Excel para mejorar la compresión y análisis de los datos, la información que no estaba disponible en esta data se completó con información de los boletines (Ordenes de Trabajo) de SGO.

Registrar y Jerarquizar los Equipos. Para poder realizar esta actividad se descargó la Data de SAP PM de la taxonomía de los equipos de la Estación de Bombeo de Agua Potable Cantalejo, los datos se cotejaron con la información de SCADA, se incluyeron los equipos que hacían falta en la data, la taxonomía de los equipos se basó en la norma ISO 14224 donde se jerarquiza los equipos por la ubicación técnica, sistemas, subsistemas e ítems mantenibles, en el apéndice C se listan los equipos y su jerarquización.

Plan de Recolección de Datos. Para poder medir y analizar la confiabilidad de los equipos es necesario registrar métricas como:

- Hora inicio de la avería
- Hora fin de avería
- Parada no programada
- Tiempo de reparación
- Jerarquización de datos

Se descargó la data de SAP PM con los datos de fallas entre enero 2021 y marzo de 2024 de la EBAP Cantalejo, los datos se revisaron y para completar información faltante se revisó los boletines (Ordenes de Trabajo) de SGO. En el apéndice D se evidencia la recolección de los datos requeridos para su posterior análisis.

Los datos recolectados de la jerarquización de los equipos y los datos de fallas son la información primaria para realizar la Confiabilidad de los equipos y con los resultados obtenidos del análisis de estos se realice un plan de mantenimiento de RCM en la Estación de Bombeo de Agua Potable Cantalejo.

6.2 Análisis de la Información

Para la encuesta se debe utilizar estadística descriptiva para analizar los datos, que luego deben ser agrupados en una matriz y dividirlos en una distribución de frecuencias. De acuerdo a los valores obtenidos se debe describir y representar los datos utilizando porcentajes, gráficos circulares o barras.

Para el análisis de los equipos se debe utilizar los datos de fallas de los equipos para determinar los equipos con más fallas luego analizar los KPIs como MTBF, MTTF, MTTR para realizar el análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad CMD; y realizar el análisis de criticidad para dar prioridad al equipo o sistema más crítico para realizar el Análisis de Modos y Efectos de Falla AMEF.

6.2.1 Análisis de la Encuesta para Medir la Satisfacción Frente a la Propuesta

Cada ítem de la encuesta tiene sus propias estadísticas descriptivas calculadas, que incluyen la media, la mediana y la desviación estándar. En la tabla 5 se listan los 11 ítems que se va a analizar.

Tabla 5

Tabla de ítems de la encuesta de satisfacción realizada al personal de la DSE (Fuente los Autores)

Ítems	Descripción
1	¿La implementación de RCM sería un beneficio para la empresa?
2	¿La implementación de RCM quitaría puestos de trabajo en la empresa?
3	¿El uso de software para la gestión de mantenimiento es un beneficio para la empresa y para los trabajadores de la DSE?
4	¿El uso de tecnologías para la gestión de mantenimiento es un beneficio para la empresa y para los trabajadores de la DSE?
5	¿Reducir la tasa de fallas de los equipos mejoraría el tiempo para realizar sus actividades de mantenimiento programadas?
6	¿Considera que para reducir los tiempos de reparación de los equipos es necesario el acceso rápido a repuestos y herramientas?
7	¿Para realizar acciones de mejora y reducir el tiempo medio entre fallas de los equipos se deben tomar los datos de avería de los equipos?
8	¿Considera que la estrategia implementada de CBM (Mantenimiento Basado en la Condición) ha aumentado el tiempo de operación de los equipos?

9	¿La cantidad de actividades (Ordenes de Trabajo) de mantenimiento programado semanalmente son excesivas de acuerdo a las Horas Hombre disponibles?
10	¿Considera que se debe modificar las frecuencias del PMO (Plan de Mantenimiento Optimizado) cada dos años como resultado de acciones de mejora del RCM?
11	¿La formación y capacitación continua de RCM fortalecerá su conocimiento en la gestión de mantenimiento y la importancia de implementar estrategias de mantenimiento?

Nota. Los ítems de la encuesta fueron diseñados para analizar el nivel de satisfacción de los empleados frente al cambio de un nuevo tipo de gestión de mantenimiento. El total de encuestados fueron 35 que es el 78 % de la muestra poblacional, los datos recolectados son suficientes para poder realizar el análisis de los resultados.

Organización de los Datos de la Encuesta. La información suministrada en el formulario de Google fue almacenada y descargada en un hoja de cálculo de Excel y fue discriminada cada respuesta de los ítems, se revisó que no tuviera ningún error y se organizaron los datos de cada ítem de acuerdo a la escala Likert. En el apéndice B se expone la recolección, resultados y la organización de los datos.

Estadística Descriptiva de la Encuesta. Para una comprensión clara, fácil y detallada del instrumento, se utilizó gráficos circulares (tortas) para cada respuesta de los ítems y de esta manera representar la distribución de cada escala Likert.

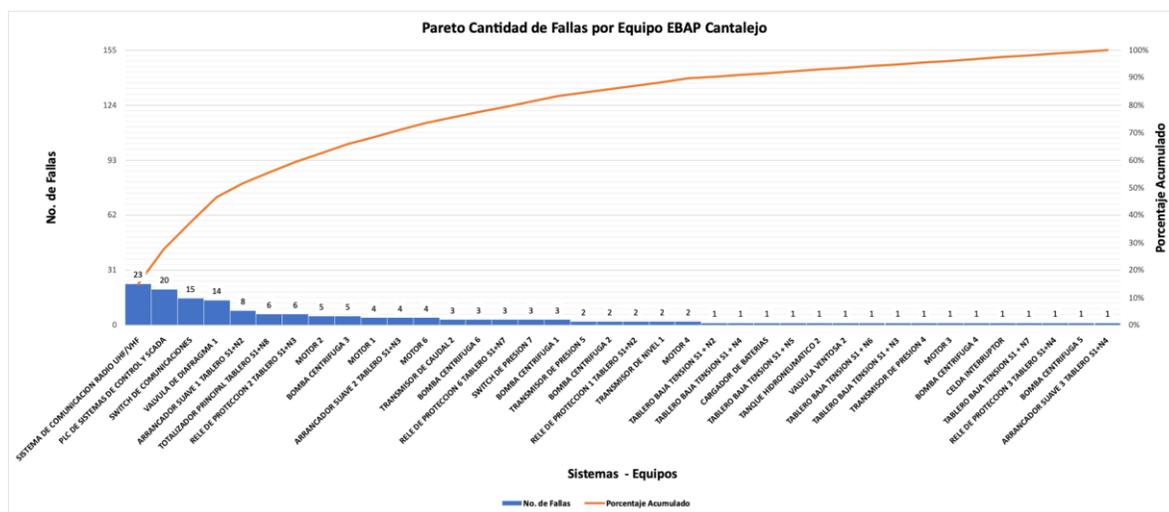
6.2.2 Análisis de Datos de Fallas de los Equipos

Para realizar el análisis de los datos de fallas de los equipos de la EBAP Cantalejo es necesario enfocar el análisis en los equipos con más número de fallas mediante el diagrama de Pareto y para este propósito se usó la tabla 1 del apéndice D.

En la figura 4 se evidencia que el 20% de los equipos representa el 80% de las fallas y el 80% de los equipos representa el 20 % de las fallas, pero debido a que los equipos con menos de 6 fallas son de tipo esporádicas en un periodo de 3 años, se centrara el análisis CMD y taxonomía en los equipos con mayor cantidad de fallas y se determinara el equipo más crítico, los equipos seleccionados son el sistema de radios UHF/VHF, PLC de sistema de control y SCADA, switch de comunicaciones y válvula de diafragma 1.

Figura 4

Diagrama de Pareto cantidad de fallas por sistema o equipo (Fuente los Autores)



Nota. El análisis de Pareto muestra de forma descendente y organizada los equipos con más fallas y así seleccionar de una manera sencilla en este caso se seleccionaron los 4 primeros sistemas o equipos: sistema de comunicaciones radio UHF/VHF, PLC de sistemas de control y SCADA, switch de comunicaciones, válvula de diafragma 1.

6.2.3 Organización de los Datos de Fallas de los Equipos

Para poder realizar el análisis de CMD de los sistemas o equipos seleccionados, primero se debe organizar los datos por cada uno de estos, para este propósito se determinó

los datos de operación por cada equipo y se discrimino los datos de falla por año 2021,2022,2023 y hasta abril de 2024. En el apéndice E se plasma la organización de datos del sistema de radio UHF/VHF, switch de comunicaciones y la válvula de diafragma 1.

Datos de Operación y Fallas PLC de Sistemas de Control y SCADA. En la tabla 6 se evidencia los datos de operación del equipo.

Tabla 6

Datos de operación PLC de sistema de control y SCADA (Fuente los Autores)

Datos de Operación del Equipo	
Días operando	7
Horas x día operando	24
No. Paradas Programadas MTTO al mes (Horas)	0
Horas x Parada Programada MTTO al mes	0
Horas Totales Paradas Programada MTTO al mes	0

Nota. De acuerdo a las actividades de mantenimiento de SAP PM los equipos electrónicos no requieren de paradas programadas para realizar actividades de mantenimiento preventivo.

La tabla 7 expone los datos de falla por año y meses, se discrimino de este modo para poder comprender de una forma más fácil los datos.

Tabla 7

Datos de falla PLC de sistema de control y SCADA (Fuente los Autores)

Año de Estudio 2021	Datos de Falla			
	Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes
PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA	Enero	744	4,000	1
	Febrero	672	5,500	3
	Marzo	744	0,000	0
	Abril	720	8,667	1
	Mayo	744	0,000	0
	Junio	720	0,000	0
	Julio	744	6,500	1
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	0,000	0
	Octubre	744	0,000	0

	Noviembre	720	0,000	0
	Diciembre	744	5,667	1
Año de Estudio 2022		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA	Enero	744	0,000	0
	Febrero	672	1,133	1
	Marzo	744	0,000	0
	Abril	720	0,000	0
	Mayo	744	7,517	1
	Junio	720	10,383	2
	Julio	744	9,500	1
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	4,400	1
	Octubre	744	11,933	2
	Noviembre	720	0,000	0
	Diciembre	744	4,000	1
Año de Estudio 2023		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA	Enero	744	0,000	0
	Febrero	672	3,500	1
	Marzo	744	1,000	1
	Abril	720	0,000	0
	Mayo	744	0,000	0
	Junio	720	0,000	0
	Julio	744	0,000	0
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	8,000	1
	Octubre	744	0,000	0
	Noviembre	720	0,000	0
	Diciembre	744	2,000	1
Año de Estudio 2024		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA	Enero	744	0,000	0
	Febrero	696	0,000	0
	Marzo	744	0,000	0
	Abril	720	0,000	0

Nota. Se evidencia que el equipo presentó una tasa de fallo mayor en el año 2022 un total de 48,86 horas inoperativo.

6.2.4 Medición de Indicadores de Desempeño KPIs de los Equipos (Gestión de la Información de los Equipos)

De acuerdo a García Garrido (2003) “debemos establecer una serie de parámetros que nos permitan evaluar los resultados que se están obteniendo en el departamento de mantenimiento para conocer la marcha del departamento, decidir si debemos realizar cambios o determinar algún aspecto específico.” (p. 255), por lo tanto, se realizó la medición a los 4 equipos del MTBF, MTTF, MTTR y con estas métricas analizar la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad llamado análisis CMD. La medición de KPIs y análisis de CMD del sistema de radio UHF/VHF, switch de comunicaciones y la válvula de diafragma 1 se evidencia en el apéndice F.

KPIs PLC de Sistemas de Control y SCADA. En la tabla 8 se analizó los KPIs como MTBF, MTTF, MTTR y la Disponibilidad con el objetivo de realizar el análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad CMD.

Tabla 8

KPIs PLC de sistemas de control y SCADA (Fuente los Autores)

<i>KPIs 2021</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	740,00	744,00	4,00	99,46%
Febrero	222,17	224,00	1,83	99,18%
Marzo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Abril	711,33	720,00	8,67	98,80%
Mayo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Junio	720,00	720,00	0,00	100,00%
Julio	737,50	744,00	6,50	99,13%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Octubre	744,00	744,00	0,00	100,00%
Noviembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Diciembre	738,33	744,00	5,67	99,24%

<i>KPIs 2022</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	670,87	672,00	1,13	99,83%
Marzo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Abril	720,00	720,00	0,00	100,00%
Mayo	736,48	744,00	7,52	98,99%
Junio	354,81	360,00	5,19	98,56%
Julio	734,50	744,00	9,50	98,72%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	715,60	720,00	4,40	99,39%
Octubre	366,03	372,00	5,97	98,40%
Noviembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Diciembre	740,00	744,00	4,00	99,46%

<i>KPIs 2023</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	668,50	672,00	3,50	99,48%
Marzo	743,00	744,00	1,00	99,87%
Abril	720,00	720,00	0,00	100,00%
Mayo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Junio	720,00	720,00	0,00	100,00%
Julio	744,00	744,00	0,00	100,00%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	712,00	720,00	8,00	98,89%
Octubre	744,00	744,00	0,00	100,00%
Noviembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Diciembre	742,00	744,00	2,00	99,73%

<i>KPIs</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	696,00	696,00	0,00	100,00%
Marzo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Abril	720,00	720,00	0,00	100,00%

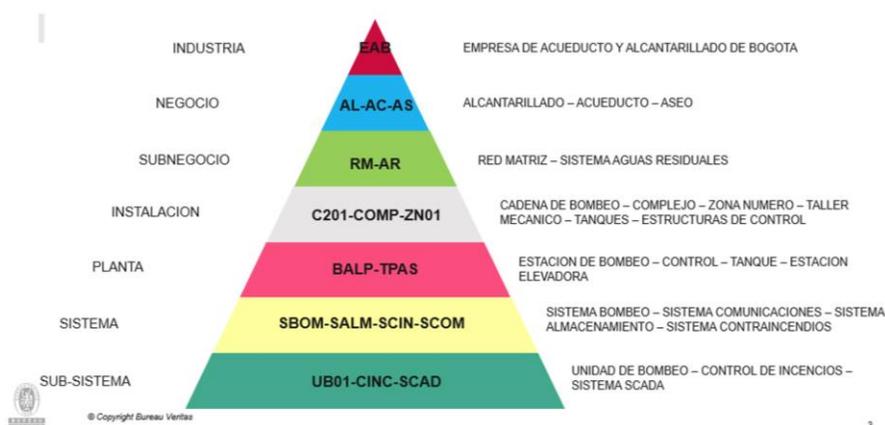
Nota. De acuerdo a la medición de KPIs se evidencia que hay una Disponibilidad del equipo del 99,77% en promedio de los tres años analizados, pero una tasa de fallos de 0,5 por mes.

6.2.5 Jerarquización de los Equipos

La taxonomía se realizó con base en la norma ISO 14224, para realizar la jerarquización de los 4 equipos se usó la tabla 1 del apéndice C. En la figura 5 se muestra la taxonomía aplicada en la EAAB.

Figura 5

Taxonomía actual EAAB según ISO 1424 (Documentación File Server EAAB)



Nota. En la figura 6 se muestra los 10 niveles para definir la ubicación técnica de los equipos, por la gran infraestructura de la EAAB se enfoca la jerarquización de los equipos en la ubicación técnica y se asignan codificaciones a estas para mejorar la comprensión de la taxonomía.

Para la presente propuesta se realizó el nivel 8 correspondiente al ítem mantenible de los 4 equipos. En la tabla 9 se evidencia la taxonomía de los 4 equipos.

Tabla 9

Taxonomía de equipos (Fuente los Autores)

DENOMINACIÓN	UBICACIÓN TÉCNICA	COMPONENTE / ÍTEM MANTENIBLE		TAG
SISTEMA DE COMUNICACIÓN RADIO UHF/VHF	EB-AC-RM-C210-BCAN-SCCT-TCRU	Data Radio Integra UHF/VHF	Sin sub-divisiones	TCRU077001
		Antena	Sin sub-divisiones	
		Cableado	Sin sub-divisiones	

PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA	EB-AC-RM-C210-BCAN-SCCT-CLLC	Tarjeta de Entradas Análogas	Unidad de Conexiones Cableado	CLLC077001
		Tarjeta de Entradas Digitales	Unidad de Conexiones Cableado	
		Tarjeta de Salidas Análogas	Unidad de Conexiones Cableado	
			Relé	
		Tarjeta de Salidas Digitales	Unidad de Conexiones Cableado	
			Relé	
		Resolución Lógica	Unidad de Procesador Central (CPU)	
			Memoria de Acceso Aleatorio (RAM)	
			Software de Vigilancia / Diagnóstico	
		Bus de Sistema	Sin sub-divisiones	
Unidad de suministro de energía	Fuente de Alimentación	TCSW077001		
Varios	Barreras Galvánicas			
SWITCH DE COMUNICACIONES	EB-AC-RM-C210-BCAN-SCCT-ISOTCSW	Switch Comunicaciones	Unidad de Conexiones Cableado	TCSW077001
VÁLVULA DE DIAFRAGMA 1	EB-AC-RM-C210-BCAN-SLFL-VADI	Válvula	Cuerpo de la Válvula	
			Bonete	
			Uniones Embridadas	
			Anillos del Asiento	
			Empaquetadura	
			Sellos	
			Obturador	
			Vástago	
			Resorte	
			Accionado	Diafragma
Control y Monitoreo	Válvula de Solenoide			
Varios	Acumulador	VADI077001		
	Otros			

Nota. El nivel 8 de ítems mantenibles se hizo en base a la norma ISO 14224, jerarquizar los sistemas o equipos es indispensable para el AMEF y realizas acciones proactivas por cada ítem.

6.2.6 *Análisis de Criticidad*

Se realizó mediante los siguientes datos de la EBAP Cantalejo:

- Datos de prestación del servicio: Capacidad de Bombeo Nominal. Tabla 1 apéndice G.
- Indicador de frecuencia: Periodicidad de la ocurrencia de la falla. Tabla 2 apéndice G.
- Indicador de la no prestación del servicio: porcentaje de tiempo que no hay prestación del servicio de agua. Tabla 3 apéndice G.
- Indicador de consecuencias: Impacto a la seguridad, impacto al medio ambiente, pérdida en el servicio, costos de reparación. Tabla 4 apéndice G.

Los cálculos y análisis de la criticidad se evidencian en la figura 1 del apéndice G. Como resultado del análisis el PLC es el equipo más crítico y se debe hacer el Análisis de Modos y Efectos Falla AMEF, para este propósito se debe empezar identificando los procesos que realiza el equipo. En la figura 6 se evidencia los resultados de análisis de criticidad.

Figura 6

Matriz de criticidad (Fuente los Autores)

FRECUENCIA	5	20	40	60	80	100
	4	16	32	48 TCRU077001	64 CLLC077001	80
	3	12	24	36	48	60
	2	8	16	24 TCSW077001	32 VADI077001	40
	1	4	8	12	16	20
Cr = F x C	4	8	12	16	20	
CONSECUENCIA						

Nota. Para el análisis de criticidad el PLC (TAG CLLC077001) presento más impacto en la prestación de servicio de agua a pesar de que el sistema de radio UHF/VHF tenía una cantidad mayor de fallas, por esta razón la propuesta de solución será enfocada en el PLC.

Descripción de las Funciones del PLC. En la EBAP Cantalejo, el PLC realiza distintos procesos fundamentales para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de la estación. Estos procesos son:

- Control de las unidades de bombeo: El PLC controla el encendido y apagado de las unidades de bombas de acuerdo a la demanda del servicio.
- Supervisar los niveles de agua: El PLC recoge datos de los transmisores de nivel de agua y supervisa frecuentemente los niveles en los tanques o cárcamo.
- Supervisar la presión y flujo: El PLC supervisa los datos recolectados de los transmisores de presión y flujo que están en las tuberías para establecer niveles

seguros y ajustar la velocidad de las unidades de bombeo o apagarlas si es necesario.

- Control de velocidad de las unidades de bombeo: El PLC ajusta la velocidad de las unidades de bombas para mejorar la eficiencia energética y mejorar la vida útil de las unidades de bombeo.
- Detección de fallas: El PLC tiene la capacidad de monitorizar las unidades de bombas y demás equipos en busca de fallas o problemas.
- Control de válvulas: El PLC controla las válvulas para cambiar el flujo de agua (aguas arriba, aguas abajo) de forma eficiente.
- Gestión de alarmas: El PLC emite alarmas si hay inconvenientes la presión, caudal, niveles, fallas en las unidades de bombeo. Este sistema de alarmas está conectado al SCADA y de esta manera Centro de Control toma medidas correctivas rápidamente.
- Registro de datos en IHM: El PLC registra todos los datos de operación en una Interfaz Hombre Maquina que está en la estación de bombeo para mejor comprensión para el operador.

Como conclusión, el PLC es vital en el control y supervisión de la Estación de Bombeo de Agua Potable de Cantalejo, garantizando su funcionamiento seguro, confiable y eficiente.

Análisis de Modos de Falla y Efectos de Falla. Moubray (2004) formula “las 7 preguntas básicas de la filosofía RCM” (p. 7), bajo la consigna de estas preguntas se realizó el análisis AMEF para el PLC. En la tabla 10 se evidencia el análisis AMEF para las 5 primeras preguntas.

- ¿Cuál es la función?
- ¿Cuál es la falla funcional?
- ¿Cuál es el modo de falla?
- ¿Cuál es el efecto de la falla?
- ¿Cuál es la consecuencia de la falla?

Tabla 10

Análisis modos de falla y efectos de falla del PLC (Fuente los Autores)

Análisis de Modos y Efectos de Falla AMEF					
Función	Falla Funcional	Modo de Falla (Causa de la Falla)	Efecto (Que ocurre cuando Falla)	Consecuencia (Que ocurre cuando Falla)	
PLC: Controlar y supervisar el funcionamiento de los equipos de la EBAP Cantalejo para garantizar un bombeo seguro y eficiente del agua	A No controla el encendido y apagado de las unidades de bombas	1 Problemas de adquisición de datos entre tarjeta I/O análoga o digital y relés de protección	1 Errores en la lectura o escritura de señales y se prenden la unidades de bombeo	1 Funcionamiento en vacío de las unidades de bombeo	
		2 Problemas de adquisición de datos entre tarjeta I/O análoga o digital y relés de protección	2 Errores en la lectura o escritura de señales y se apagan las unidades de bombeo	2 Interrupción del servicio	
		3 Errores de procesamiento, bloqueos del sistema, reinicios inesperados de la CPU	3 Sobrecargas, recalentamiento o daño físico y se alarman los relés de protección	3 Funcionamiento en vacío de las unidades de bombeo, interrupción del servicio	
		4 Bucles infinitos, condiciones mal definidas de la CPU	4 Comportamiento no deseado del sistema, acciones ilógicas y se alarman los relés de protección	4 Funcionamiento en vacío de las unidades de bombeo, interrupción del servicio	
		5 Fallas en la batería, errores de escritura o lectura de la RAM	5 Pérdida de configuraciones, datos incorrectos o desactualizados y se alarman los relés de protección	5 Funcionamiento en vacío de las unidades de bombeo, interrupción del servicio	
		6 Pérdida de energía en el PLC, luces indicadoras apagadas	6 Sobretensiones, fluctuaciones de voltaje y se apaga el PLC	6 Interrupción del servicio	

	B	No supervisar los niveles de agua, de presión y flujo	1	Problemas de adquisición de datos entre tarjeta I/O analoga o digital y la instrumentación	1	Errores en la lectura o escritura de señales y no se controlan los datos de la instrumentación	1	Rebose de los tanques, daño de la tubería, funcionamiento en vacío de las unidades de bombeo, falla de comunicaciones en SCADA
			2	Errores de procesamiento, bloqueos del sistema, reinicios inesperados de la CPU	2	Sobrecargas, recalentamiento o daño físico y no se controlan los datos de la instrumentación	2	Rebose de los tanques, daño de la tubería, funcionamiento en vacío de las unidades de bombeo, falla de comunicaciones en SCADA
			3	Bucles infinitos, condiciones mal definidas de la CPU	3	Comportamiento no deseado del sistema, acciones ilógicas y no se controlan los datos de la instrumentación	3	Rebose de los tanques, daño de la tubería, funcionamiento en vacío de las unidades de bombeo, falla de comunicaciones en SCADA
			4	Fallas en la batería, errores de escritura o lectura de la RAM	4	Pérdida de configuraciones, datos incorrectos o desactualizados y no se controlan los datos de la instrumentación	4	Rebose de los tanques, daño de la tubería, funcionamiento en vacío de las unidades de bombeo, falla de comunicaciones en SCADA
			5	Pérdida de energía en el PLC, luces indicadoras apagadas	5	Sobretensiones, fluctuaciones de voltaje y se apaga el PLC	5	Interrupción del servicio
	C	Control de válvulas	1	Problemas de adquisición de datos entre tarjeta I/O analoga o digital y los actuadores de las válvulas	1	Errores en la lectura o escritura de señales y no hay comunicación de datos de los actuadores de las válvulas	1	Sobre torque en los actuadores de las válvulas, no se cierra al 0%, no se abre al 100%, interrupción del servicio
			2	Errores de procesamiento, bloqueos del sistema, reinicios inesperados de la CPU	2	Sobrecargas, recalentamiento o daño físico y no hay comunicación de datos de los actuadores de las válvulas	2	Sobre torque en los actuadores de las válvulas, no se cierra al 0%, no se abre al 100%, interrupción del servicio
			3	Bucles infinitos, condiciones mal definidas de la CPU	3	Comportamiento no deseado del sistema, acciones ilógicas y no hay comunicación de datos de los actuadores de las válvulas	3	Sobre torque en los actuadores de las válvulas, no se cierra al 0%, no se abre al 100%, interrupción del servicio
			4	Fallas en la batería, errores de escritura o lectura de la RAM	4	Pérdida de configuraciones, datos incorrectos o desactualizados y no hay comunicación de datos de los actuadores de las válvulas	4	Sobre torque en los actuadores de las válvulas, no se cierra al 0%, no se abre al 100%, interrupción del servicio
			5	Pérdida de energía en el PLC, luces indicadoras apagadas	5	Sobretensiones, fluctuaciones de voltaje y se apaga el PLC	5	Interrupción del servicio
	D	Registro de datos en IHM	1	Problemas de adquisición de datos entre tarjeta I/O analoga o digital y la IHM	1	Errores en la lectura o escritura de señales y no se visualizan los datos en la IHM	1	El operador de la estación no puede visualizar datos y no es posible tomar decisiones
			2	Errores de procesamiento, bloqueos del sistema, reinicios inesperados de la CPU	2	Sobrecargas, recalentamiento o daño físico y no se visualizan los datos en la IHM	2	El operador de la estación no puede visualizar datos y no es posible tomar decisiones

		3	Bucles infinitos, condiciones mal definidas de la CPU	3	Comportamiento no deseado del sistema, acciones ilógicas y no se visualizan los datos en la IHM	3	El operador de la estación no puede visualizar datos y no es posible tomar decisiones
		4	Fallas en la batería, errores de escritura o lectura de la RAM	4	Pérdida de configuraciones, datos incorrectos o desactualizados y no se visualizan los datos en la IHM	4	El operador de la estación no puede visualizar datos y no es posible tomar decisiones
		5	Pérdida de energía en el PLC, luces indicadoras apagadas	5	Sobretensiones, fluctuaciones de voltaje y se apaga el PLC	5	Interrupción del servicio

Nota. El análisis AMEF es una herramienta efectiva para poder priorizar las acciones de mejora y plantear una perspectiva proactiva para gestionar los riesgos por fallas del PLC. Las tareas de cada modo de falla se evidencian en los resultados.

7 Resultados

Conforme al análisis de la información de la encuesta y de los análisis de:

Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad o RAM por sus siglas en inglés, AMEF y Criticidad de los equipos en el capítulo 6, es pertinente plasmar los resultados, analizarlos, discutirlos y realizar las propuestas de solución pertinentes para el presente proyecto.

7.1 Resultados de la Encuesta

Fiabilidad del Instrumento. La fiabilidad de la medida es esta propiedad de la exactitud que genera consistencia, estabilidad y reproducibilidad en las medidas proporcionadas por el instrumento. En este contexto, la confiabilidad es comparable a la estabilidad y la predictibilidad. Esta es la definición más frecuente de esta expresión. (Ruiz Bolívar, 2013)

Se aplicó el coeficiente alfa de Cronbach que proporciona una medida de la fiabilidad y evalúa la consistencia interna del instrumento (la escala Likert), en la ecuación 6 se expresa matemáticamente este coeficiente.

Ecuación 6

Ecuación Coeficiente alfa de Cronbach (Ruiz Bolívar, 2013)

$$r_{TT} = \frac{n}{n-1} * \frac{S_t^2 - \sum_{i=1}^n S_i^2}{S_t^2}$$

Nota. Donde

r_{TT} = Coeficiente de fiabilidad del instrumento

n = Número de ítems del instrumento

S_t^2 = Varianza total del instrumento

$\sum_{i=1}^n S_i^2$ = Sumatoria de las varianzas individuales de los ítems

El apéndice H evidencia los cálculos realizados para hallar la fiabilidad de la encuesta, el resultado de la fiabilidad del instrumento es de 0.8, de acuerdo con los rangos establecidos en la tabla 11 la fiabilidad de la encuesta es Alta.

Tabla 11

Magnitudes para evaluar la fiabilidad como resultado del alfa de Cronbach (Ruiz Bolívar, 2013)

RANGO α			MAGNITUD α
0,81	a	1,00	Muy alta
0,61	a	0,80	Alta
0,41	a	0,60	Moderada
0,21	a	0,40	Baja
0,01	a	0,20	Muy baja

Nota. De acuerdo con Sampieri (2014) “un valor de alfa de Cronbach mayor a 0.7 generalmente se considera aceptable, aunque este umbral puede variar según el contexto de la investigación” (p. 207), de acuerdo con la tabla y la aceración del autor la encuesta de la presente propuesta es alta.

Se evidencio que los ítems 1, 3, 4, 5, 6, 7, 11 tienen un alto porcentaje de satisfacción en promedio es de 91,8%, las preguntas refrentes a estos ítems están enfocadas en aspectos de mediciones de desempeño y algunas generalidades de la filosofía RCM. En el apéndice I se evidencia la estadística descriptiva de los ítems mencionados.

7.2 Análisis e Interpretación de los Resultados de la Encuesta

El análisis de la encuesta de satisfacción (instrumento), ayudo a entender las opiniones y percepciones de los encuestados acerca de la propuesta de mantenimiento RCM en la EBAP Cantalejo, también fue una herramienta para descubrir las necesidades y preferencias del personal de la DSE.

- Ítem 2. El 34% que representa 12 encuestados están en desacuerdo, el 26 % que representa 11 encuestados están totalmente en desacuerdo y el 23% que representa 8 encuestados están ni de acuerdo ni en desacuerdo en que “la implementación de RCM quitaría puestos de trabajo en la empresa”, de acuerdo a estos resultados el 61% de los encuestados está satisfecho con el ítem 2, pero hay un porcentaje del 23% que no tiene una posición concreta. De acuerdo a estos resultados los encuestados no tienen clara la filosofía de RCM ya que son los "clientes" del área de mantenimiento. Esto quiere decir que no entienden tan bien por qué los sistemas y equipos requieren otras estrategias de mantenimiento a parte del mantenimiento

básico, y el beneficioso que esto conlleva para la empresa y para los operadores que deben realizar algunas actividades de mantenimiento. (Moubray, 2004)

En el tabla 12 y figura 7 se evidencia el análisis de la estadística descriptiva del ítem 2.

Tabla 12

Resultados de la estadística descriptiva ítem 2 (Fuente los Autores)

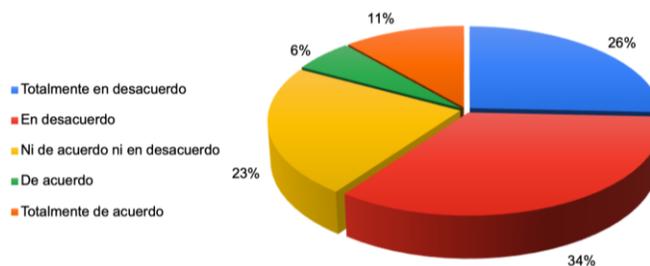
Ítem 2			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	9	25,7%
En desacuerdo	2	12	34,3%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	8	22,9%
De acuerdo	4	2	5,7%
Totalmente de acuerdo	5	4	11,4%

Nota. Se uso componentes básicos de estadística como media, mediana y moda, para realizar el análisis descriptivo estadístico.

Figura 7

Resultados de la estadística descriptiva ítem 2 (Fuente los Autores)

2. ¿La implementación de RCM quitaría puestos de trabajo en la empresa?



Nota. En el análisis de la estadística descriptiva del ítem 3 se muestra gráficamente la alta apatía del 23% de los encuestados.

- *Ítem 8.* El 43% que representa 15 encuestados están de acuerdo, el 34% que representa 12 encuestados están totalmente de acuerdo y el 14% que representa 5 encuestados están ni de acuerdo ni en desacuerdo en que “considera que la estrategia implementada de CBM (Mantenimiento Basado en la Condición) ha aumentado el tiempo de operación de los equipos”, de acuerdo a estos resultados el 77% de los encuestados está satisfecho con el ítem 8, pero hay un porcentaje del 14% que no tiene una posición concreta. De acuerdo a estos resultados se evidencia el desconocimiento de las ventajas de la filosofía CBM como: tiene una gran probabilidad de anticipar la aparición de fallas, porque demuestra durante el desarrollo de estas, cuando la variable de referencia se descontrola; Debido a que la mayoría de análisis, test y comprobaciones se llevan a cabo con el equipo en funcionamiento hay poco impacto en la producción; reducir la cantidad de tiempo para intervenir el equipo; solo se interviene el equipo cuando se evidencia una falla incipiente. (Montilla Montaña, 2019)

En el tabla 13 y figura 8 se evidencia el análisis de la estadística descriptiva del ítem 8.

Tabla 13

Resultados de la estadística descriptiva ítem 8 (Fuente los Autores)

Escala	Ítem 8		
	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	1	2,9%
En desacuerdo	2	2	5,7%

Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	5	14,3%
De acuerdo	4	15	42,9%
Totalmente de acuerdo	5	12	34,3%

Nota. Se uso componentes básicos de estadística como media, mediana y moda, para realizar el análisis descriptivo estadístico.

Figura 8

Resultados de la estadística descriptiva ítem 8 (Fuente los Autores)



Nota. En el análisis de la estadística descriptiva del ítem 8 se muestra gráficamente la apatía del 14% de los encuestados.

- Ítem 9. El 28% que representa 10 encuestados están de totalmente de acuerdo, el 23% que representa 8 encuestados están de acuerdo, el 23% que representa 8 encuestados están en desacuerdo y el 20% que representa 7 encuestados están ni de acuerdo ni en desacuerdo en que “la cantidad de actividades (Ordenes de Trabajo) de mantenimiento programado semanalmente son excesivas de acuerdo a las Horas Hombre disponibles”, este numeral fue el que más porcentaje similares arrojó y se interpreta de la siguiente manera:

- El 28 % que están totalmente de acuerdo y el 23 % que están de acuerdo suman el 51 % de los encuestados, 10 tienen cargos operativos y 8 tienen cargos administrativos.
- El 23% que están en desacuerdo de los encuestados, 7 tienen cargos administrativos y 1 tiene cargo operativo.
- El 20 % que no tiene una posición concreta de los encuestados, 5 tienen cargos operativos y 2 tienen cargos administrativos.
- El 6 % que está totalmente en desacuerdo los encuestados, 1 tiene cargo operativo y 1 tienen cargo administrativo.

Se evidencia claramente la división de opinión que hay entre los cargos administrativos y operativos referente a la cantidad de actividades semanales programadas. La carga de trabajo se mantiene constante a lo largo del año en un departamento de mantenimiento ideal. Todas las actividades están planificadas, programadas y repartidas de forma equitativa, lo que garantiza que el número de horas y de personal dedicados al mantenimiento se mantiene invariante cada mes. Como resultado, la disponibilidad del personal de mantenimiento permanece constante. Sin embargo, no es la norma. La cantidad de trabajo es variante y alcanza máximos y mínimos en momentos concretos del año. Los picos de trabajo se producen principalmente durante las revisiones importantes (paradas programadas o intervenciones en equipos críticos) o en imprevistos importantes. (García Garrido, 2003)

En el tabla 14 y figura 9 se evidencia el análisis de la estadística descriptiva del ítem 9.

Tabla 14

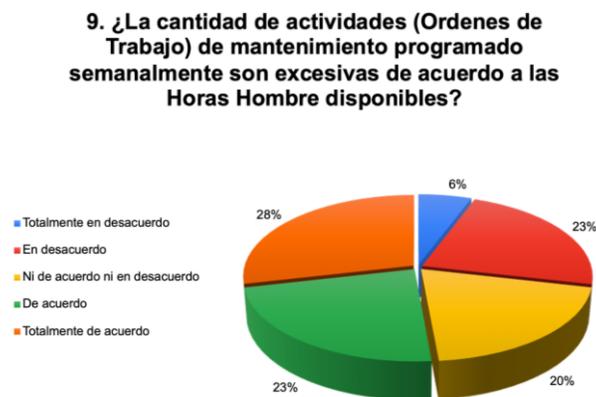
Resultados de la estadística descriptiva ítem 9 (Fuente los Autores)

Ítem 9			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	2	5,7%
En desacuerdo	2	8	22,9%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	7	20,0%
De acuerdo	4	8	22,9%
Totalmente de acuerdo	5	10	28,6%

Nota. Se uso componentes básicos de estadística como media, mediana y moda, para realizar el análisis descriptivo estadístico.

Figura 9

Resultados de la estadística descriptiva ítem 9 (Fuente los Autores)



Nota. En el análisis de la estadística descriptiva del ítem 9 se muestra gráficamente la división generalizada respecto a la pregunta.

- *Ítem 10.* El 29% que representa 10 encuestados están de totalmente de acuerdo, el 28% que representa 10 encuestados están de acuerdo, el 26% que representa 9 encuestados están ni de acuerdo ni en desacuerdo y el 11% que representa 4 encuestados están en desacuerdo en que “considera que se debe modificar las

frecuencias del PMO (Plan de Mantenimiento Optimizado) cada dos años como resultado de acciones de mejora del RCM”. De acuerdo a los resultados de este ítem se evidencia que el 54% de los encuestados no saben que el PMO o no consideran efectiva la táctica de PMO. El Plan de Mantenimiento Optimizado (PMO) surge como una opción atractiva y en plantas donde debido a la complejidad no se ha conseguido implantar con éxito el RCM. El RCM Es especialmente aconsejable para equipos nuevos o en fase inicial en una planta, mientras que la táctica PMO es perfecta para equipos operativos y que llevan en funcionamiento durante un periodo de tiempo. La táctica PMO ofrece un apoyo sustancial a las acciones planificadas que requieren el esfuerzo colaborativo de múltiples equipos para alcanzar sus objetivos, y exigen un seguimiento, supervisión y control diligentes hasta su plena finalización e implementación. (Mora Gutiérrez, 2009)

En el tabla 15 y figura 10 se evidencia el análisis de la estadística descriptiva del ítem 10.

Tabla 15

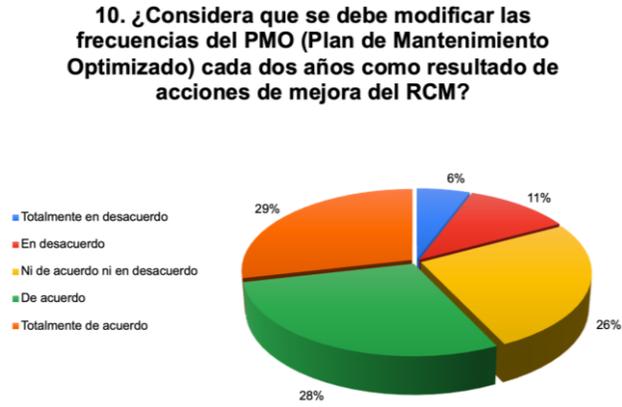
Resultados de la estadística descriptiva ítem 10 (Fuente los Autores)

Ítem 10			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	2	5,7%
En desacuerdo	2	4	11,4%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	9	25,7%
De acuerdo	4	10	28,6%
Totalmente de acuerdo	5	10	28,6%

Nota. Se uso componentes básicos de estadística como media, mediana y moda, para realizar el análisis descriptivo estadístico.

Figura 10

Resultados de la estadística descriptiva ítem 10 (Fuente los Autores)



Nota. En el análisis de la estadística descriptiva del ítem 10 se muestra gráficamente la poca comprensión que se tiene de la táctica PMO en la División de Servicios de Electromecánica.

Discusión. De acuerdo a los resultados de la encuesta se evidencia la importancia del aporte del recurso humano a la filosofía de RCM, el personal de la DSE es fundamental para que la propuesta de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM en la Estación de Bombeo de Agua Potable Cantalejo sea una acción de mejora viable. Hace varias décadas (60-70), las empresas destinaban dos dólares a materiales y piezas de recambio por cada dólar gastado en mano de obra de mantenimiento. Los esfuerzos por optimizar se centraban en el ahorro de material, ya que cualquier medida que redujera el uso de piezas de recambio tendría un mayor impacto en el resultado final que una reducción de personal. Hoy, la situación es totalmente distinta: por cada euro invertido en piezas de recambio, los departamentos de mantenimiento invierten dos euros en mano de obra. (García Garrido, 2003)

7.3 Resultados del Análisis CMD y AMEF

Resultados Análisis CMD. En la tabla 16 se evidencia los cálculos realizados para obtener la Confiabilidad y la Mantenibilidad del PLC de acuerdo a estos datos que fueron organizados del MTBF más bajo al más alto se obtuvieron los siguientes resultados:

- Confiabilidad $R(t)$: Se pronostica que el tiempo esperado antes de que ocurra otra falla con un $R(t)$ de 90 % es de 420 Horas. En la figura 11 se muestra la relación de Confiabilidad $R(t)$ y Desconfiabilidad $F(t)$.
- Mantenibilidad: Se pronostica que el tiempo medio de reparación del PLC es 9,6 Horas. En la figura 12 se evidencia la gráfica de Mantenibilidad $M(t)$.
- Disponibilidad: De acuerdo a la tabla 8 la disponibilidad de equipo en los años estudiados es del 97.47%

Tabla 16

Confiabilidad y Mantenibilidad PLC de sistemas de control y SCADA (Fuente los Autores)

i	Tiempo	RM(t)	X	Y
1	222,17	0,017	5,403	-4,047
2	354,81	0,042	5,872	-3,147
3	366,03	0,067	5,903	-2,671
4	670,87	0,092	6,509	-2,343
5	672,00	0,116	6,510	-2,090
6	696,00	0,141	6,545	-1,883
7	711,33	0,166	6,567	-1,707
8	715,60	0,191	6,573	-1,554
9	720,00	0,215	6,579	-1,417
10	720,00	0,240	6,579	-1,293
11	720,00	0,265	6,579	-1,179
12	720,00	0,290	6,579	-1,073
13	720,00	0,314	6,579	-0,974

14	720,00	0,339	6,579	-0,881
15	720,00	0,364	6,579	-0,793
16	720,00	0,389	6,579	-0,709
17	720,00	0,413	6,579	-0,629
18	720,00	0,438	6,579	-0,551
19	734,50	0,463	6,599	-0,476
20	736,48	0,488	6,602	-0,402
21	737,50	0,512	6,603	-0,331
22	738,33	0,537	6,604	-0,261
23	740,00	0,562	6,607	-0,192
24	740,00	0,587	6,607	-0,124
25	744,00	0,611	6,612	-0,056
26	744,00	0,636	6,612	0,011
27	744,00	0,661	6,612	0,078
28	744,00	0,686	6,612	0,146
29	744,00	0,710	6,612	0,214
30	744,00	0,735	6,612	0,284
31	744,00	0,760	6,612	0,355
32	744,00	0,785	6,612	0,429
33	744,00	0,809	6,612	0,505
34	744,00	0,834	6,612	0,586
35	744,00	0,859	6,612	0,672
36	744,00	0,884	6,612	0,766
37	744,00	0,908	6,612	0,872
38	744,00	0,933	6,612	0,995
39	744,00	0,958	6,612	1,153
40	744,00	0,983	6,612	1,400

WEIBULL

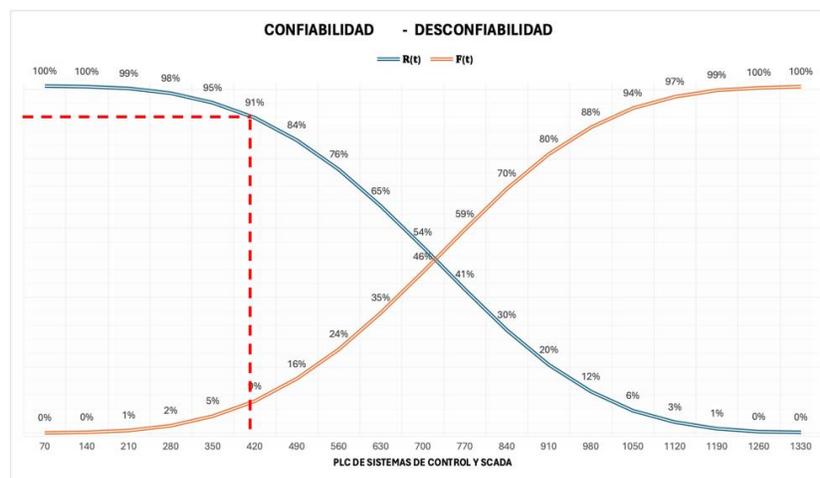
Tiempos	R(t)	Densidad	Tasa de Fallas	F(t)
70	100%	7,26838E-06	7,2694E-06	0%
140	100%	4,55915E-05	4,56714E-05	0%
210	99%	0,000132797	0,000133823	1%
280	98%	0,000280695	0,00028694	2%
350	95%	0,000493347	0,000518485	5%
420	91%	0,000763266	0,000840768	9%
490	84%	0,001067673	0,001265255	16%
560	76%	0,001367295	0,001802756	24%
630	65%	0,001610508	0,002463553	35%

700	54%	0,001744502	0,003257486	46%
770	41%	0,001731918	0,004194019	59%
840	30%	0,001567011	0,005282292	70%
910	20%	0,001282595	0,006531157	80%
980	12%	0,000941362	0,007949212	88%
1050	6%	0,000613404	0,009544828	94%
1120	3%	0,000350991	0,011326168	97%
1190	1%	0,000174286	0,01330121	99%
1260	0%	7,41565E-05	0,015477756	100%
1330	0%	2,66778E-05	0,017863453	100%

Nota. Para determinar cuándo (tiempo) es necesario realizar alguna acción o tarea de mantenimiento es importante predecir cuando baja la confiabilidad al 90%.

Figura 11

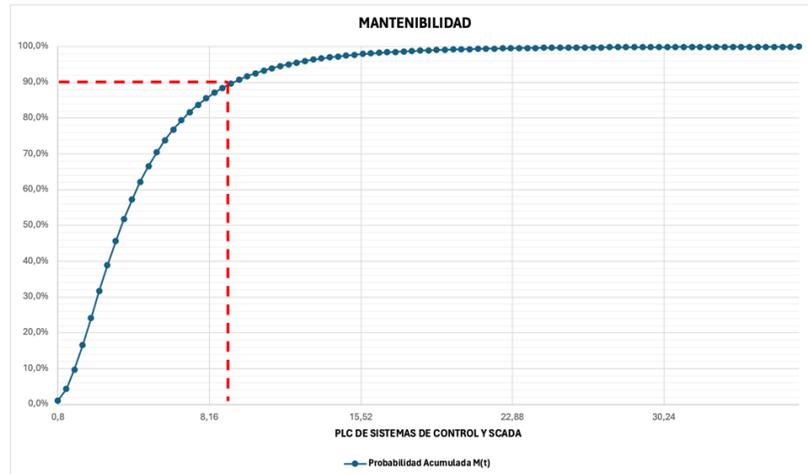
Confiabilidad $R(t)$ Vs Desconfiabilidad $F(t)$ del PLC de sistemas de control y SCADA (Fuente los Autores)



Nota. De acuerdo a la gráfica de evidencia que la caída de la Confiabilidad $R(t)$ no es abrupta esto significa que las fallas no son constantes ni tampoco son fallas tempranas por incorporación de un nuevo equipo.

Figura 12

Mantenibilidad $M(t)$ del PLC de sistemas de control y SCADA (Fuente los Autores)



Nota. En la gráfica se evidencia que la curva aumenta rápidamente lo que indica una indisponibilidad alta del equipo y un promedio de fallos alto en los años estudiados.

Resultado AMEF. De acuerdo a la taxonomía del PLC y del análisis de las primeras 5 preguntas del AMEF, se realizaron las tareas de mantenimiento del PLC por cada modo de falla. En la tabla 17 se proponen las tareas de mantenimiento para el PLC por cada modo de falla.

Dos últimas preguntas de la filosofía RCM:

- ¿Qué se puede hacer para impedir o mitigar la consecuencia de la falla?
- ¿Qué se puede hacer si no se descubre una tarea para evitar o minimizar la consecuencia de la falla?

Tabla 17

Tareas de mantenimiento para el PLC (Fuente los Autores)

Tareas de Mantenimiento																
Tipo de consecuencia					Tipo de Tareas					Descripción de las Tareas Propuestas	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad de Ejecutantes	Horas Hombre	Equipo Operando	
Oculto	Seguridad	Ambiente	Operacional	No Operacional	Inspecciones Operacionales	Inspecciones Funcionales	Basada en Condic. (CBM)	Preventivo	Correctivo							Rediseño
			X					X			Revisar y verificar que todas las conexiones eléctricas estén firmes y en buen estado	3 M	Electrónico	2	3x2	Si
	X							X			Revisar y verificar que todas las conexiones eléctricas estén firmes y en buen estado	3 M	Electrónico	2	3x2	Si
			X			X					Revisar los programas para detectar errores o conflictos lógicos	1 M	Electrónico	2	4x2	Si
			X			X					Verificar el programa y lógica de programación del PLC y garantizar el funcionamiento de acuerdo con los requisitos operativos	1 M	Electrónico	2	4x2	Si
			X			X					Revisar los programas para detectar errores o conflictos lógicos	1 M	Electrónico	2	4x2	Si
	X							X			Revisar y verificar que todas las conexiones eléctricas estén firmes y en buen estado	3 M	Electrónico	2	3x2	Si
	X							X			Revisar y verificar que todas las conexiones eléctricas estén firmes y en buen estado	3 M	Electrónico	2	3x2	Si
	X					X					Revisar los programas para detectar errores o conflictos lógicos	1 M	Electrónico	2	4x2	Si
	X					X					Verificar el programa y lógica de programación del PLC y garantizar el funcionamiento de acuerdo con los requisitos operativos	1 M	Electrónico	2	4x2	Si
	X					X					Revisar los programas para detectar errores o conflictos lógicos	1 M	Electrónico	2	4x2	Si

7.4 Análisis e Interpretación de los Resultados del PLC

Los resultados del análisis CMD del PLC pueden pronosticar que hay varios factores que afectan la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad como:

- La mala gestión en el mantenimiento a causa de tareas que no están bien enfocadas a verificar la función del equipo, frecuencias de mantenimiento mal planificadas, falta de acciones proactivas que ataquen los fallos funcionales del equipo.
- El tiempo de reparación del equipo es muy alta debido a desconocimiento del personal técnico, no hay procedimientos establecidos para reconocer de forma ágil los fallos de acuerdo a los partes mantenibles del equipo, un mal análisis de los modos de falla.
- El CBM es ineficaz para predecir fallos en equipos electrónicos y se debe usar otra estrategia efectiva para este tipo de equipos.

Respecto al AMEF y la tareas de mantenimiento que arrojo es claro que la forma más efectiva de aumentar la Confiabilidad del PLC es realizar Inspecciones Funcionales mensuales y el método de detección de algún fallo es mediante software de diagnóstico. También se debe realizar Mantenimiento Preventivo trimestral con una tareas específicas y claras.

Discusión. El análisis de CMD basado en los KPIs de cada equipo importante para pronosticar el tiempo en el equipo puede fallar, el análisis de criticidad que dio como resultado que el PLC es el equipo más crítico a pesar de que el equipo con más fallas es el sistema de radio UHF / VHF y el AMEF que como resultado generó unas tareas de

mantenimiento de acuerdo a cada modo de falla, factores que determinan que acción de mejora se debe realizar para evitar el fallo reiterativos.

La lista de procedimientos de mantenimiento planificado que deben seguirse en una planta para garantizar los niveles de disponibilidad predeterminados figura en el plan de mantenimiento. Se trata de un documento en constante mejora, ya que siempre está cambiando como resultado del análisis de diferentes indicadores de gestión y de acciones relacionadas con la planta. (García Garrido, 2003)

Es importante resaltar que en los planes de mantenimiento para equipos electrónicos en la DSE no está contempladas la inspecciones funcionales, un gran aporte que se realiza en esta propuesta para mitigar un promedio de falla del PLC de 0,5 veces por mes.

7.5 Propuesta de Solución: Plan de Capacitación de Mantenimiento de RCM y Plan de Mantenimiento de RCM para el PLC

7.5.1 Plan de Capacitación de Mantenimiento de RCM

Con esta propuesta se pretende atacara todos los ítems con baja satisfacción por el desconocimiento de la filosofía de RCM. La capacitación se contratara con una empresa externa a la EAAB – ESP, dicha empresa se encargara de todo la planificación y programación de la capacitación virtual, la persona que servirá como supervisor por parte del Acueducto es el Jefe de la División Táctica. En la tabla 18 se expone el Plan de Capacitación de Mantenimiento RCM.

Tabla 18

Plan de Capacitación de Mantenimiento RCM (Fuente los Autores)

PLAN DE CAPACITACIÓN VIRTUAL (Empieza el 03/02/2025)								
Introducción al Mantenimiento Centrado en Confiabilidad			No. Horas	Día	No. De Participante x Sesión	División Táctica	División Ejecución	División Logística
1	1.1	Importancia de la confiabilidad	0,5	1	20	18 funcionarios 1 sesión	40 funcionarios 2 sesión	15 funcionarios 1 sesión
	1.2	RCM. Que es y sus orígenes	0,5					
	1.3	Relación entre TPM y RCM	0,5					
	1.4	Política de manejo de fallas	0,5					
	1.5	Las 7 preguntas básicas del proceso RCM	1					
Intensidad Horaria			3					
Fundamentos de ingeniería de mantenimiento y Confiabilidad			No. Horas	Día	No. De Participante x Sesión	División Táctica	División Ejecución	División Logística
2	2.1	La confiabilidad	0,5	2	20	18 funcionarios 1 sesión	40 funcionarios 2 sesión	15 funcionarios 1 sesión
	2.2	Ciclo de vida de un activo	0,5					
	2.3	Funciones, Fallas	0,5					
	2.4	Ejercicios: Confiabilidad y funciones	1					
	2.5	MTTF / MTBF	0,5					
	2.6	Fases de fallas	0,5					
Intensidad Horaria			3,5					
Ciclo de vida de los activos			No. Horas	Día	No. De Participante x Sesión	División Táctica	División Ejecución	División Logística
3	3.1	La curva de la bañera	0,5	3	20	18 funcionarios 1 sesión	40 funcionarios 2 sesión	15 funcionarios 1 sesión
	3.2	MTTF, MTBF, MTTR, Disponibilidad	0,5					
	3.3	Cálculo de MTBF y disponibilidad	0,5					
	3.4	Enfoque del personal de mantenimiento	0,5					
	3.5	Razón de fallas	0,5					
	3.6	Función (F) Confiabilidad R(t)	0,5					
	3.7	Función Densidad de Probabilidad de Fallas f(t)	0,5					
Intensidad Horaria			3,5					
Fundamentos de análisis de estadísticas de Falla			No. Horas	Día	No. De Participante x Sesión	División Táctica	División Ejecución	División Logística
4	4.1	Histogramas	0,5	4	20	18 funcionarios 1 sesión	40 funcionarios 2 sesión	15 funcionarios 1 sesión
	4.2	Gráficos de fallas acumuladas	0,5					

	4.3	Ejemplos de histogramas	0,5					
	4.4	Ejercicios: Histogramas y F. Acumuladas	0,5					
	4.5	Método / Parámetros de Weibull	0,5					
	4.6	Waloddf Weibull: Notas históricas	0,5					
Intensidad Horaria			3					
Introducción a la distribución de Weibull		No. Horas	Día	No. De Participante x Sesión	División Táctica	División Ejecución	División Logística	
5	5.1	Ecuaciones de la distribución de Weibull	0,5	5	20	18 funcionarios 1 sesión	40 funcionarios 2 sesión	15 funcionarios 1 sesión
	5.2	Gráficos de Weibull	0,5					
	5.3	Papel probabilístico de Weibull	0,5					
	5.4	Vida característica	0,5					
	5.5	Parámetro de forma	0,5					
	5.6	Edad de trazo	0,5					
Intensidad Horaria			3					
Duración				16	16	16	16	

Nota. El plan de capacitación está diseñado para ser ejecutado en 5 días por cada división de la DSE. La capacitación se contrata con un proveedor especializado en este tipo de capacitaciones, la aprobación está sujeta a las políticas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP. La capacitación iniciaría el 2 de febrero de 2025 y finalizaría el 6 de marzo de 2025.

Se analizaron 3 proveedores para contratar la capacitación, se evaluó en estos experiencia, presencia en el país, contenido de la capacitación y duración.

- EliteTraining: \$ 142.350.000
- Predictiva 21: \$ 105.850.000
- SKF: \$ 142.350.000

Se seleccionó la compañía SKF por los costos y porque es un proveedor de equipos y repuestos de la EAAB desde hace 30 años. En el apéndice J se evidencia el diagrama de Gantt del Plan de Capacitación Virtual en RCM.

7.5.2 Propuesta de Solución: Plan de Mantenimiento de RCM para el PLC

De acuerdo a García Garrido (2003) “el Plan de Mantenimiento es un documento vivo” (p.37) , basándose en esta premisa es importante realizar una serie de documentos como: diagrama de Gantt para planificar la tareas de mantenimiento, indicadores KPIs para medir la efectividad del plan de mantenimiento y plan de mejora del plan de mantenimiento para realizar revisiones periódicas.

Todos los documentos que se van a realizar tendrán una fecha del 1 de febrero de 2025 debido a que el Plan de Mantenimiento Optimizado PMO de la DSE está diseñado para un año con un ciclo que inicia el 31 de enero y finaliza el 1 de febrero.

La planificación y programación del Plan está a cargo de la División Táctica, la División de Ejecución se encargara del cumplimiento de las tarea del Plan, el análisis de la información suministradas en las ordenes de trabajo estará a cargo del Analista de datos y todo el análisis correspondiente de RCM estará a cargo del Ingeniero de Confiabilidad.

Inspecciones Funcionales Mensuales. Las inspecciones funcionales se aseguran de que un equipo pueda desempeñar eficazmente las tareas para las que fue creado, en lugar de centrarse en cualidades particulares como la calidad del material o la estética. Esta técnica se apoya de instrumentos de medición y software de diagnóstico para el caso del PLC TIA Portal.

Descripción de las tareas propuestas:

1. Revisar los programas para detectar errores o conflictos lógicos utilizando software TIA Portal 4 Horas 2 ejecutantes Horas Hombre 4 x 2.
2. Verificar el programa, la lógica de programación del PLC y garantizar el funcionamiento de acuerdo con los requisitos operativos usando software de diagnóstico TIA Portal 4 Horas 2 ejecutantes Horas Hombre 4 x 2.

Mantenimiento Preventivo Trimestral. La definición de este mantenimiento fue expresado en el marco teórico de la propuesta.

Descripción de las tareas propuestas:

1. Revisar y verificar que todas las conexiones eléctricas estén firmes y en buen estado 3 Horas 2 ejecutantes Horas Hombre 3 x 2.
2. Limpiar el PLC y realizar Backup de la lógica de programación con TIA Portal 2 Horas 2 ejecutantes Horas Hombre 2 x 2.
3. Verificar con Centro de Control comunicación con SCADA 1 Hora 2 ejecutantes Horas Hombre 1 x 2.

Cada tarea será asignada en SAP PM y para cada una se realizara una orden de trabajo.

Diagrama de Gantt. El diagrama de Gantt es fundamental para planificar y plasmar las actividades de la propuesta de Mantenimiento de RCM para el PLC en un año. Ofrece una interpretación gráfica de las tareas planificadas, incluidas las fechas de inicio y fin el

tiempo de ejecución de cada actividad y las relaciones entre las distintas tareas. En el apéndice J se evidencia el diagrama de Gantt del plan de Mantenimiento RCM del PLC.

Indicadores KPIs. En la DSE se tienen implementados KPIs que están enfocados en la efectividad del PMO, estos indicadores no miden la Confiabilidad, la Mantenibilidad y la Disponibilidad de los equipos críticos.

Se propone en el Plan de Mantenimiento RCM para el PLC medir los siguientes KPIs:

- MTBF: Tiempo medio entre fallas
- MTTR: Tiempo medio de reparación
- MTTF: Tiempo medio hasta la falla

Con la recolección de datos de SAP PM se realiza la medición de los KPIs propuestos, esta actividad se realizara mensualmente, el análisis CMD se realizara anualmente para poder ajustar el Plan de Mantenimiento de RCM del PLC de esta forma se puede medir la efectividad del Plan, también es necesario que el Plan este alineado con el Plan de Mantenimiento Optimizado PMO.

Plan de Mejora. El Plan de mejora se basa en el análisis CMD y en los datos de falla de SAP PM del PLC, que ajustan el AMEF y la frecuencias de las actividades.

8 Análisis Financiero

La Disponibilidad de los activos ha mejorado hasta un 30% o más en determinadas investigaciones y estudios de casos tras la implantación de RCM. Esto permite evitar averías y maximizar la Disponibilidad de activos vitales. El RCM se centra en determinar y clasificar los trabajos de mantenimiento más eficaces. (Mora Gutiérrez, 2009)

Es indispensable recordar que la implementación de RCM obedece a una serie de variables, incluida la calidad de los datos de entrada, la dedicación de los colaboradores, la dirección y la incorporación perfecta con otros procedimientos de gestión de actividades. Los resultados pueden variar, por lo que es crucial examinar minuciosamente cada circunstancia en el análisis financiero.

Teniendo en cuenta estos aspectos en la tabla 19 se realizó el análisis financiero de la presente propuesta para calcular el Retorno Sobre la Inversión (ROI).

Tabla 19

Análisis financiero de la propuesta de un Plan de Mantenimiento RCM para el PLC de la EBAP Cantalejo (Fuente los Autores)

Costos Inversión Capacitación Virtual RCM	\$	142.350.000		
Costos Inversión Plan RCM	Sueldo Anual de Ingeniero de Confiabilidad CPS	\$	54.000.000	
	Sueldo Anual Analista de Datos CPS	\$	66.000.000	
	Software RCM	\$	800.000.000	
	Total	\$	920.000.000	
Costos Inversión Total	\$	1.062.350.000		
Costos Sin Plan de Mantenimiento RCM PLC			Costos con Plan Mantenimiento RCM PLC Reducción 30%	
Costos x Falla del PLC Anuales	Costos x Reparación PLC Anual	\$	60.000.000	\$ 477.476.088
	Costo de Bombero Perdido Anual	\$	1.068.272.400	
	Costos x Oportunidad Anual	\$	228.400.000	
	Costos x Seguridad	\$	6.514.560	
	Costos x Horas Hombre x Reparación	\$	94.000.000	
	Costos x Rendimiento Operativo	\$	134.400.000	
	Total	\$	1.591.586.960	
R.O.I		33%		

Nota. Los costos y ventajas de poner en práctica el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) pueden compararse para determinar el retorno de la inversión (ROI) del proceso RCM.

Como se puede evidenciar en la tabla 19 el costo más alto es por la pérdida de la prestación del servicio por un valor de \$ 1.068.272.400 anual, este costo por falla del PLC llega a igualar el valor total de la inversión de la propuesta que es de \$ 1.062.350.000, el costo de reparación del PLC es bajo si se compara con equipos mecánicos o eléctricos, pero la pérdida de la prestación del servicio por falla del PLC puede derivar en demandas de la comunidad o la falla del PLC puede rebosar los tanques, reboses que podrían generar inundaciones y contaminación del agua que genera demandas con multas astronómicas.

9 Conclusiones y Recomendaciones

9.1 Conclusiones

1. Identificar los sistemas o equipos con las fallas más reiterativas es esencial para optimizar la eficacia en la ejecución, disminución de los costos de mantenimiento y reparación. Examinándolos, se pueden encontrar las causas fundamentales de estas tendencias de fallo y tomar medidas preventivas y correctivas específicas (Montilla Montaña, 2019) . El diagrama de Pareto realizado arrojó que 4 equipos representaron el 80% de las fallas de los cuales los 3 primeros son equipos electrónicos, como análisis de este resultado se evidencia la falta de una estrategia de mantenimiento que se especialice en los equipos electrónicos, es importante resaltar que la DSE enfoca su esfuerzos en la Disponibilidad y Confiabilidad de los equipos críticos que son las Unidades de Bombeo teniendo establecido un grupo de CBM, que se centra en el análisis de estos sistemas que tienen elementos mecánicos

y eléctricos, pero el CBM en la DSE de la EAAB ESP no tiene una metodología para predecir las fallas de equipos electrónicos, esto se ve reflejado en la baja tasa de falla de equipos electromecánicos y la alta tasa de fallas de los equipos electrónicos, todo lo anterior hace que la estrategia de Mantenimiento Preventivo para los equipos electrónicos no sea efectiva y no se cumpla con un 85% de la programación semanal por dedicar el tiempo en atender fallos electrónicos que son reiterativos.

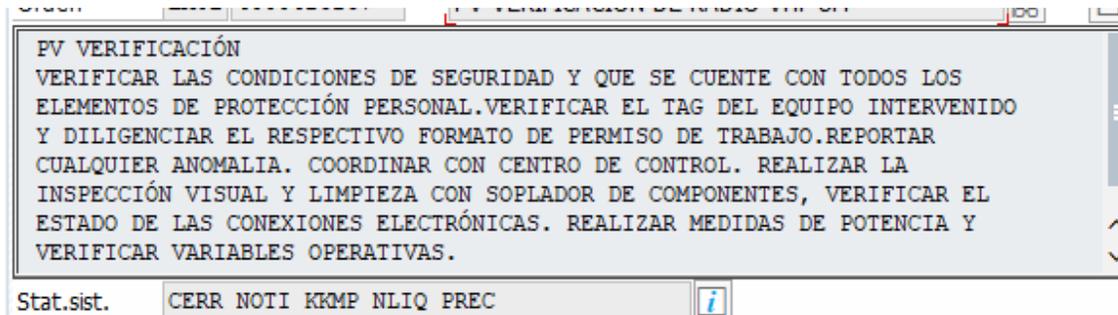
2. La taxonomía permite centralizar esfuerzos en las partes o ítems mantenibles que tengan un impacto real en el buen funcionamiento del sistema o equipo. Adicional a esto, al crear la jerarquización, se toman decisiones bien fundamentadas sobre cómo distribuir los fondos de mantenimiento, qué tan importante es la sustitución o la actualización de sistemas o equipos y qué partes del protocolo de mantenimiento necesitan mejoras (García Garrido, 2003). Realizando la jerarquización de los 4 equipos seleccionados se evidenció que en SAP PM no está completo el árbol de equipos, para la presente propuesta fue necesario realizar el nivel 8 de taxonomía de acuerdo al norma ISO 14224, es importante tener la información completa de cada sistema o equipo para poder hacer un AMEF preciso y enfocado.
3. Para asignar eficazmente los recursos y priorizar las acciones, es esencial calcular la criticidad de los sistemas o equipos a los que se han reconocido los fallos más reiterativos. Este procedimiento implica estimar los efectos sobre la seguridad, el servicio prestado y los costos de reparación que puede tener un fallo en cualquier sistema o equipo (García Garrido, 2003). De acuerdo a los resultados obtenidos por

el diagrama de Pareto el Sistema de Comunicaciones UHF/VHF es el equipo con más fallas, pero los resultados del análisis de criticidad arrojaron que el equipo más crítico es el PLC, esto debido a que el PLC controla toda la lógica de programación de la EBAP Cantalejo y cualquier fallo en este equipo repercute en un corte de agua mientras se opera el bombeo de forma manual, durante este periodo que la estación entra de modo automático a manual el costo por no prestar el servicio de agua es elevado, un promedio de 94 horas de parada anual se pierden \$ 1.068.272.400 anualmente, esto a pesar de los bajos costos de reparación asociado al PLC de \$ 60.000.000 anuales, costos que se evaluaron en el análisis financiero.

4. El Análisis de Modos de Falla y Efectos de Falla (AMEF) es una técnica útil para determinar a qué sistemas o equipos hay que dar prioridad, este método sistemático permite fragmentar cada parte de un sistema o equipo, señalar los Modos de Falla potenciales, evaluar las consecuencias de esas fallas y clasificar la gravedad, aparición y detección de cada falla y determinar que acciones proactivas se deben tomar (Moubray, 2004). De acuerdo a los resultados del AMEF que se basa en las 5 primeras preguntas de esta metodología el PLC requiere de tareas específicas que no están contempladas en el PMO de la DSE y no siguen las recomendaciones del fabricante, en la figura 12 se evidencia las tareas a realizar en un Mantenimiento para el PLC de la EBAP Cantalejo, las tareas propuestas son básicas y no hay un análisis exhaustivo de la lógica de programación propia de cada Estación de Bombeo. En general es importante que la DSE se base en el AMEF para poder realizar actividades enfocadas y recomendadas por el fabricante para los equipos electrónicos.

Figura 13

Tarea propuesta en una Orden de Trabajo de SAP PM para el PLC de Cantalejo (Fuente SAP PM)



Nota. En la Orden de Trabajo se evidencia que la tarea para el PLC es muy básica, no sigue las recomendaciones del fabricante para el mantenimiento adecuado del equipo, tiene poca información y no es relevante para verificar el funcionamiento del PLC.

5. Para encontrar las técnicas de mantenimiento más efectivas y prácticas, es necesario realizar una evaluación completa de los sistemas y equipos antes de crear un plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), lo que se ha desarrollado en la presente propuesta para poder cumplir con el ultimo objetivo de presentar un Plan de Mantenimiento RCM para el PLC de la EBAP Cantalejo. Al final del proceso RCM, se creó un plan organizado que se enfoca en maximizar la Confiabilidad y reducir los costos de mantenimiento del PLC. (Moubray, 2004)

El Plan tiene un enfoque de mantenimiento proactivo y metódico que se basó en la función y el rendimiento de cada componente, así como la evaluación de los modos de fallo probables y sus ramificaciones. Esto reduce la posibilidad de averías imprevistas, reduce el tiempo de inactividad y aumenta la disponibilidad operativa del PLC. Además, la estrategia RCM ayuda a mejorar la rentabilidad, la seguridad y

la eficiencia a largo plazo de la DSE, al adaptar los métodos de mantenimiento a los objetivos empresariales y los requisitos operativos. La DSE tiene definido el Mantenimiento Preventivo para el PLC cada 3 meses, pero las tareas están desenfocadas de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, y de acuerdo al análisis CMD la falla del PLC se presenta 0,5 veces por mes, por esta razón es imperativo incluir Inspecciones Funcionales mensuales con ciertas actividades específicas y que se deben realizar con software de diagnóstico especializado para el PLC.

La propuesta también contempló el talento humano de la DSE, esta información se recolectó mediante una encuesta de satisfacción para describir la aceptación de la propuesta, como resultado el 91% está de acuerdo con el Plan de Mantenimiento RCM, pero algunos ítems de la propuesta generaron confusión y se concluye que como valor agregado al Plan RCM se debe realizar una Capacitación de RCM al personal de la DSE. En resumen, crear una estrategia RCM es una inversión estratégica que favorece la viabilidad y el éxito de las operaciones a largo plazo en un 30% y requiere de ciertas acciones proactivas como Mantenimiento Preventivo, Inspecciones Funcionales y una capacitación constante en RCM.

9.2 Recomendaciones

1. Es pertinente que la EAAB – ESP en cabeza de la Dirección de Servicios de Electromecánica diseñe actividades de mantenimiento distinta al Mantenimiento Preventivo para evitar las fallas reiterativas de los equipos electrónicos, ya que estos duplican en todas las estaciones a los equipos mecánicos y eléctricos, los encargados de diseñar el PMO en la DSE en su mayoría son especialistas en equipos

eléctricos y mecánicos y de acuerdo a su análisis el costo de un equipo electrónico es muy bajo y prefieren llevar hasta la falla estos equipos, pero el proceso de contratación y consecución de los equipos en la EAAB - ESP es un proceso burocrático que lleva demasiado tiempo, lo que conlleva al deterioro de las Unidades de Bombeo de la Estaciones.

2. La taxonomía es un método sistemático que especifica cada ítem mantenible para mejorar la comprensión de que parte del equipo está fallando y centralizar los esfuerzos para evitar futuros fallos y cambiar de manera eficaz la parte en daño, la EAAB – ESP contrató a la empresa Bureau Veritas para realizar la taxonomía de los sistemas y equipos, pero la información entregada y cargada en SAP PM de varias Estaciones de Bombeo está incompleta, la EAAB – ESP debe realizar una auditoria más exhaustiva y sistemática al momento de la entrega de esta documentación porque a la fecha de esta propuesta se han realizado muchos reprocesos para poder completar la taxonomía de forma correcta y precisa.
3. La Criticidad de los equipos se modifica cuando se ajusta el PMO, y este plan varia cada 4 años con el cambio estratégico general de la empresa, La DSE debe implementar un grupo interdisciplinario que se encargue de realizar Análisis de Criticidad y RCA (Análisis Causa Raíz), los resultados de estos análisis deben modificar anualmente el PMO.
4. Es fundamental que la DSE implemente la metodología AMEF que ofrece un conocimiento exhaustivo de los peligros relacionados con un sistema o equipo, lo que permite a los equipos de ingeniería y gestión de mantenimiento decidir la mejor

manera de aumentar la eficiencia, la seguridad y la confiabilidad. La EAAB – ESP puede disminuir los costos de mantenimiento, reparación y salvaguardar la disponibilidad abordando de forma proactiva los modos de fallo más importantes.

5. Actualmente en la DSE se están dando los primeros pasos para la implementación de RCM la presente propuesta podría servir como piloto, ya que toda la información recolectada y analizada fue suministrada por la ERP SAP una herramienta fundamental para la implementación de RCM, pero que requiere de datos fiables para poder desarrollar la taxonomía, el análisis CMD, Análisis de Criticidad y el AMEF, también se evidenció que el PMO de la EAAB – ESP no contempla las Inspecciones Funcionales para ningún equipo o sistema mecánico, eléctrico o electrónico, las dos últimas preguntas del AMEF dieron como resultado este tipo de inspecciones para el PLC. Es fundamental que se implementen este tipo de actividades o acciones proactivas en la DSE en particular para equipos electrónicos donde el CBM no tiene la capacidad de predecir los fallos.

10 Referencias Bibliográficas

- Alvarado Briones, C. (2021). *Gestión de conservación en estaciones de bombeo de aguas residuales. Aplicación de la confiabilidad en el mantenimiento* [Tesis para optar al título de master en planificación y gestión de infraestructuras, Universidad Politécnica de Madrid].
<https://oa.upm.es/71990/>
- Ardila Ávila, H. A., Corchuelo Mora, J. D., y Montero Moyano, F. (2022). *Propuesta de implementación paso 1 pilar del mantenimiento basado en la metodología de mejoramiento continuo TPM mantenimiento productivo total en línea piloto calderas aceite térmico y vapor del área servicios industriales de la compañía nacional de*

chocolates fábrica Bogotá [Proyecto de grado para optar al título de especialista en gerencia de mantenimiento, Universidad ECCI].

<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/3267>

Arguello Trujillo, C. E., y Cruz Bernal, I. M. (2018). *Procedimiento para recalcular la frecuencia de mantenimiento preventivo en equipos médicos del Hospital Bosa segundo nivel E.S.E.* [Proyecto de grado para optar al título de especialista en gerencia de mantenimiento, Universidad ECCI].

<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/1311>

Barreto Santos, W. G., Molina Hernández, J., y González Cuadrado, B. (2018). *Aplicación de la metodología de AMEF en mantenimiento de prensa hidráulica para ensamble de ejes pesados en ZOFICOL* [Proyecto de grado para optar al título de especialista en gerencia de mantenimiento, Universidad ECCI].

<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/3021>

Barrios Fernández, J. A. (2020). *Procedimiento para la gestión del mantenimiento eficiente en la UEB de Acueducto y Alcantarillado de Holguín* [Tesis presentada en opcional título de ingeniero industrial, Universidad de Holguín].

<https://repositorio.uho.edu.cu/xmlui/handle/uho/8398>

Boero, C. (2017). *Mantenimiento Industrial* (1a ed.). Universitas. Editorial Científica Universitaria.

Delgado Bravo, D. J. (2023). *Análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad del sistema de bombeo de relaves de la minera Chinalco Perú S.A* [Tesis para optar al título profesional de ingeniero mecánico, Universidad Politécnica Amazónica].

<http://hdl.handle.net/20.500.12897/225>

Enciso Linares, M. E. (2022). *Elaboración de propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para los componentes electromecánicos de la estación de bombeo San Dionisio y línea de impulsión Consuelo* [Monografía para optar por el título de especialista en gerencia de mantenimiento y confiabilidad, Universidad Pontificia Bolivariana].

<https://acrobat.adobe.com/link/review?uri=urn%3Aaaid%3Ascds%3AUS%3A0d1a99eb-b1ac-3269-91e9-e2a3491aae4f>

- García Garrido, S. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento* (1a ed.). Ediciones Díaz de Santos, S. A.
- García Rodríguez, A. (2018). *Diseño de un modelo de gestión de mantenimiento basado en la gestión del conocimiento para la dirección de sistemas de bombeo GAM del instituto costarricense de acueductos y alcantarillados* [Práctica de especialidad para optar por el título de ingeniero en mantenimiento industrial con el grado académico de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
<https://hdl.handle.net/2238/10431>
- Haro Villacís, E. M., y Correa Jácome, J. F. (2011). *Estudio de la base del mantenimiento y su influencia en la confiabilidad de las estaciones de bombeo poliducto Shushufindi – Quito en la empresa petrocomercial filial de Petroecuador* [Proyecto de grado para optar al título de ingeniero mecánico, Universidad Técnica de Ambato].
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/1264>
- Knezevic, J. (1996). *Mantenibilidad* (1a ed.). Isdefe.
- Laguna Garzón, L. H. (2022). *Diseño de un plan de mantenimiento con metodología AMEF y CMD para los equipos electromecánicos críticos de la estación elevadora “La Isla” de la empresa de acueducto y alcantarillados de Bogotá – EAAB ESP* [Trabajo de grado para optar al título de especialista en gerencia de mantenimiento, Universidad Industrial de Santander].
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12176>
- Minotta Peñaloza, C. I., y Peña Salinas, N. I. (2022). *Metodología de gestión integral del riesgo para la dirección de servicios electromecánica de la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá ESP* [Proyecto de grado para optar al título de magister en gestión integral del riesgo, Universidad Externado de Colombia].
<https://bdigital.uexternado.edu.co/handle/001/13654>
- Montilla Montaña, C. A. (2019). *Mantenimiento Industrial y su Administración* (1a ed.). Editorial Universidad Tecnológica de Pereira.
- Mora Gutiérrez, L. A. (2009). *Mantenimiento: Planeación, Ejecución y Control* (1a ed.). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad* (3a ed.). Aladon Ltd.
- Nachlas, J. A. (1995). *Fiabilidad* (1a ed.). Isdefe.

- Pérez Carmona, R. (2013). *Diseño y Construcciones de Alcantarillados Sanitario, Pluvial y Drenaje en Carreteras* (1a ed.). Ecoe Ediciones.
- Ranjan Mohanty, A. (2015). *Machinery Condition Monitoring: Principles and Practices* (1a ed.). CRC Press Taylor y Francis Group.
- Rincón Vergel, Y. E., Rojas Fernández, O. J., y Lozada Guiza, J. (2018). *Propuesta de implementación de un modelo de mantenimiento basado en condición para equipos de aire acondicionado en sucursales bancarias de Norte de Santander* [Proyecto de grado para optar al título de especialista en gerencia de mantenimiento, Universidad ECCI].
<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/2039>
- Rodríguez Azuero, A. H., Cubillos Forero, H. A., y Muñoz Calvo, J. A. (2019). *Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo para la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Cogua Cundinamarca caso de estudio: cámara de vacío* [Proyecto de grado para optar al título de especialista en gerencia de mantenimiento, Universidad ECCI].
<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/1966>
- Rojas Rodríguez, G., y Posada Vargas, A. G. (2022). *Diseño de un plan de mejora para el mantenimiento de la empresa transportes vigía, línea de vehículos Volkswagen* [Proyecto de grado para optar al título de especialista en gerencia de mantenimiento, Universidad ECCI].
<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/3553>
- Ruiz Bolívar, C. (2013). *Instrumentos y Técnicas de Investigación Educativa Un Enfoque Cuantitativo y Cualitativo para la Recolección y Análisis de Datos* (3a ed.). DANAGA Training and Consulting.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación* (6a ed.). Mc GRAW-HILL.
- SISTEC EAAB, D. (2023). *Catálogo De Normas Y Especificaciones Técnicas*.
https://www.acueducto.com.co/wps/wcm/connect/EAB2/7c2a586c-1650-4963-aa6b-cbdd3c2b2f10/Catalogo+de+Normas+y+Especificaciones+Técnicas.pdf?MOD=AJPERESyCACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18_K862HG82NOTF70QEKDBLFL3000-7c2a586c-1650-4963-aa6b-cbdd3c2b2f10-n6tTWD0

Villanueva González, G. A., Naranjo Mateus, A. F., y Jerez Romero, E. (2021).
*Propuesta de mejora de la gestión de mantenimiento de los activos de una
compañía certificadoras de productos y servicios* [Proyecto de grado para optar
al título de especialista en gerencia de mantenimiento, Universidad ECCI].
<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/1025>

11 Apéndices

11.1 Apéndice A. Diseño de la Encuesta

Encuesta de Satisfacción Para una Propuesta de un Plan de Mantenimiento de RCM (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad)

Por favor, calificar su satisfacción para una propuesta de un plan de mantenimiento RCM en la EBAP Cantalejo de la EAAB - ESP, utilizando una escala del 1 al 5, donde:

1. Totalmente en desacuerdo
2. En desacuerdo
3. Ni de acuerdo ni en desacuerdo
4. De acuerdo
5. Totalmente de acuerdo

RCM es una técnica utilizada en la gestión de activos industriales para lograr que la estrategia de mantenimiento sea la más eficiente posible. Se enfoca en identificar las características esenciales de los activos y crear planes de mantenimiento específicos para aumentar su confiabilidad y disponibilidad.

Esta encuesta permitirá evaluar el nivel de acuerdo y satisfacción de los participantes con respecto a la presentación de una propuesta de un plan de mantenimiento RCM, proporcionando una perspectiva cuantitativa sobre su efectividad y áreas de mejora.

Nombre:

Cargo:

Ítems

1. ¿La implementación de RCM sería un beneficio para la empresa?
2. ¿La implementación de RCM quitaría puestos de trabajo en la empresa?
3. ¿El uso de software para la gestión de mantenimiento es un beneficio para la empresa y para los trabajadores de la DSE?
4. ¿El uso de tecnologías para la gestión de mantenimiento es un beneficio para la empresa y para los trabajadores de la DSE?
5. ¿Reducir la tasa de fallas de los equipos mejoraría el tiempo para realizar sus actividades de mantenimiento programadas?
6. ¿Considera que para reducir los tiempos de reparación de los equipos es necesario el acceso rápido a repuestos y herramientas?
7. ¿Para realizar acciones de mejora y reducir el tiempo medio entre fallas de los equipos se deben tomar los datos de avería de los equipos?
8. ¿Considera que la estrategia implementada de CBM (Mantenimiento Basado en la Condición) ha aumentado el tiempo de operación de los equipos?
9. ¿La cantidad de actividades (Ordenes de Trabajo) de mantenimiento programado semanalmente son excesivas de acuerdo a las Horas Hombre disponibles?
10. ¿Considera que se debe modificar las frecuencias del PMO (Plan de Mantenimiento Optimizado) cada dos años como resultado de acciones de mejora del RCM?
11. ¿La formación y capacitación continua de RCM fortalecerá su conocimiento en la gestión de mantenimiento y la importancia de implementar estrategias de mantenimiento?

11.2 Apéndice B. Recolección de los Datos de la Encuesta

Tabla B1

Recolección de los datos de la encuesta en hoja de cálculo de Excel

Marca temporal	Nombre	Cargo	Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3	Pregunta 4	Pregunta 5	Pregunta 6	Pregunta 7	Pregunta 8	Pregunta 9	Pregunta 10	Pregunta 11
4/2/2024 10:43:13	Jeimmy Rocío Marín Torres	Programadora SAP PM MM	5	1	5	4	4	4	5	3	2	4	5
4/2/2024 10:47:31	John Edison Ramos Daza	Tecnólogo Operativo	4	3	3	4	4	5	4	4	4	4	4
4/2/2024 10:48:23	Carol Pineros	Programadora SAP PM MM	4	1	5	5	4	5	5	4	2	5	5
4/2/2024 10:48:39	Harrison Daza	Técnico Administrativo	5	3	5	5	5	5	4	4	3	4	4
4/2/2024 10:56:19	Javier reyes	Técnico Operativo	5	4	5	5	5	5	5	5	4	4	4
4/2/2024 10:59:34	Joan Chaves	Técnico Operativo	4	1	5	5	5	5	5	5	3	5	5
4/2/2024 11:06:06	Héctor Campos	Técnico Operativo	5	5	3	3	5	5	5	3	5	3	4
4/2/2024 11:07:34	Oscar Rojas González	Ingeniero de Mantenimiento	5	2	4	4	5	4	4	4	2	4	4
4/2/2024 11:09:23	Camilo Gil	Tecnólogo Operativo	5	3	5	5	5	5	1	1	5	1	5
4/2/2024 11:15:02	Diego J Jácome	Técnico Operativo	5	2	4	5	5	5	4	4	5	4	5
4/2/2024 11:17:05	Oscar Garzón	Técnico Operativo	4	2	4	4	4	4	4	4	3	3	4
4/2/2024 11:19:18	Alexander Castañeda	Tecnólogo Operativo	5	3	5	5	5	5	5	5	3	4	5
4/2/2024 11:19:43	Michael Enciso	Ingeniero de Mantenimiento	4	2	5	4	4	5	5	5	5	5	5
4/2/2024 11:34:02	Mateo Santos	Tecnólogo Operativo	4	1	5	5	5	5	5	2	4	4	3
4/2/2024 11:44:37	Eduardo García Acosta	Tecnólogo Operativo	3	5	3	4	5	5	5	4	5	1	3

11.3 Apéndice C. Taxonomía Equipos EBAP Cantalejo

Tabla C1

Jerarquización de equipos Estación de Bombeo de Agua Potable Cantalejo (Fuente SAP PM)

[Apéndice C,D.pdf](#)

11.4 Apéndice D. Datos de Fallas Equipos

Tabla D1

Datos de fallas Estación de Bombeo de Agua Potable Cantalejo (Fuente SAP PM)

[Apéndice C,D.pdf](#)

11.5 Apéndice E. Organización de los Datos de los Equipos

Datos de Operación y Fallas Sistema de Comunicación Radio UHF/VHF

En la tabla E1 se evidencia los datos de operación del equipo y la tabla E2 expone los datos de falla por año y meses.

Tabla E1

Datos de operación Sistema de comunicación radio UHF/VHF (Fuente los Autores)

Datos de Operación del Equipo	
Días operando	7
Horas x día operando	24
No. Paradas Programadas MTTO al mes (Horas)	0
Horas x Parada Programada MTTO al mes	0
Horas Totales Paradas Programada MTTO al mes	0

Nota. De acuerdo a las actividades de mantenimiento de SAP PM los equipos electrónicos no requieren de paradas programadas para realizar actividades de mantenimiento preventivo.

Tabla E2

Datos de falla Sistema de comunicación radio UHF/VHF (Fuente los Autores)

Año de Estudio 2021		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
SISTEMA DE COMUNICACIÓN RADIO UHF/VHF	Enero	744	6,167	2
	Febrero	672	0,000	0
	Marzo	744	0,000	0
	Abril	720	0,000	0
	Mayo	744	4,500	1
	Junio	720	0,000	0
	Julio	744	4,000	1
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	0,000	0
	Octubre	744	0,000	0
	Noviembre	720	0,000	0
	Diciembre	744	0,000	0
Año de Estudio 2022		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
	Enero	744	0,000	0

SISTEMA DE COMUNICACIÓN RADIO UHF/VHF	Febrero	672	0,000	0
	Marzo	744	9,300	1
	Abril	720	8,667	2
	Mayo	744	2,367	1
	Junio	720	24,483	3
	Julio	744	3,583	2
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	9,483	2
	Octubre	744	18,933	3
	Noviembre	720	0,000	0
	Diciembre	744	4,000	1
	Año de Estudio 2023		Datos de Falla	
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
SISTEMA DE COMUNICACIÓN RADIO UHF/VHF	Enero	744	1,833	1
	Febrero	672	0,000	0
	Marzo	744	2,000	1
	Abril	720	3,000	2
	Mayo	744	0,000	0
	Junio	720	0,000	0
	Julio	744	0,000	0
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	0,000	0
	Octubre	744	0,000	0
	Noviembre	720	0,000	0
	Diciembre	744	0,000	0
Año de Estudio 2024		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
SISTEMA DE COMUNICACIÓN RADIO UHF/VHF	Enero	744	0,000	0
	Febrero	696	0,000	0
	Marzo	744	0,000	0
	Abril	720	0,000	0

Nota. Se evidencia que el equipo presentó una tasa de fallo mayor en el año 2022 un total de 48,86 horas inoperativo.

Datos de Operación y Fallas Switch de Comunicaciones

En la tabla E3 se evidencia los datos de operación del equipo y la tabla E4 expone los datos de falla por año y meses.

Tabla E3

Datos de operación switch de comunicaciones (Fuente los Autores)

Datos de Operación del Equipo	
Días operando	7
Horas x día operando	24
No. Paradas Programadas MTTO al mes (Horas)	0
Horas x Parada Programada MTTO al mes	0
Horas Totales Paradas Programada MTTO al mes	0

Nota. De acuerdo a las actividades de mantenimiento de SAP PM los equipos electrónicos no requieren de paradas programadas para realizar actividades de mantenimiento preventivo.

Tabla E4

Datos de falla switch de comunicaciones (Fuente los Autores)

Año de Estudio 2021		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
SWITCH DE COMUNICACIONES	Enero	744	0,000	0
	Febrero	672	0,000	0
	Marzo	744	0,000	0
	Abril	720	0,000	0
	Mayo	744	0,000	0
	Junio	720	0,000	0
	Julio	744	0,000	0
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	0,000	0
	Octubre	744	0,000	0
	Noviembre	720	0,000	0
	Diciembre	744	0,000	0
Año de Estudio 2022		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
SWITCH DE COMUNICACIONES	Enero	744	0,000	0
	Febrero	672	0,000	0
	Marzo	744	5,250	1
	Abril	720	0,000	0
	Mayo	744	15,483	3
	Junio	720	33,417	4
	Julio	744	2,750	1
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	0,000	0
	Octubre	744	6,733	1
	Noviembre	720	2,500	1
	Diciembre	744	0,000	0
Año de Estudio 2023		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
SWITCH DE COMUNICACIONES	Enero	744	0,000	0

Año de Estudio 2024		Datos de Falla		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
	Febrero	672	10,083	2
	Marzo	744	0,000	0
	Abril	720	5,500	1
	Mayo	744	0,000	0
	Junio	720	0,000	0
	Julio	744	0,000	0
	Agosto	744	0,000	0
	Septiembre	720	0,000	0
	Octubre	744	0,000	0
	Noviembre	720	0,000	0
	Diciembre	744	0,000	0
SWITCH DE COMUNICACIONES	Enero	744	0,000	0
	Febrero	696	0,000	0
	Marzo	744	3,000	1
	Abril	720	0,000	0

Nota. Se evidencia que el equipo presento un tasa de fallo mayor en el año 2022 un total de 66,13 horas inoperativo.

Datos de Operación y Fallas Válvula de Diafragma 1

En la tabla E5 se evidencia los datos de operación del equipo y la tabla E6 expone los datos de falla por año y meses.

Tabla E5

Datos de operación válvula de diafragma 1 (Fuente los Autores)

Datos de Operación del Equipo	
Días operando	7
Horas x día operando	24
No. Paradas Programadas MTTO al mes (Horas)	1
Horas x Parada Programada MTTO al mes	8
Horas Totales Paradas Programada MTTO al mes	8

Nota. De acuerdo a las actividades de mantenimiento de SAP PM los equipos mecánicos requieren de 1 parada programada para realizar actividades de mantenimiento preventivo.

Tabla E6

Datos de falla válvula de diafragma 1 (Fuente los Autores)

Año de Estudio 2021	Datos de Falla
---------------------	----------------

Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
VÁLVULA DE DIAFRAGMA 1	Enero	744	8,000	0
	Febrero	672	8,000	0
	Marzo	744	8,000	0
	Abril	720	15,667	1
	Mayo	744	12,000	1
	Junio	720	21,667	1
	Julio	744	8,000	0
	Agosto	744	8,000	0
	Septiembre	720	16,000	2
	Octubre	744	8,000	0
	Noviembre	720	8,000	0
	Diciembre	744	8,000	0
Año de Estudio 2022		<i>Datos de Falla</i>		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
VÁLVULA DE DIAFRAGMA 1	Enero	744	8,000	0
	Febrero	672	8,000	0
	Marzo	744	8,000	0
	Abril	720	8,000	0
	Mayo	744	8,000	0
	Junio	720	8,000	0
	Julio	744	8,000	0
	Agosto	744	11,000	1
	Septiembre	720	17,833	2
	Octubre	744	8,000	0
	Noviembre	720	8,000	0
	Diciembre	744	19,500	1
Año de Estudio 2023		<i>Datos de Falla</i>		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
VÁLVULA DE DIAFRAGMA 1	Enero	744	8,000	0
	Febrero	672	8,000	0
	Marzo	744	8,000	0
	Abril	720	8,000	0
	Mayo	744	8,000	0
	Junio	720	8,000	0
	Julio	744	8,000	0
	Agosto	744	11,000	1
	Septiembre	720	8,000	0
	Octubre	744	14,000	1
	Noviembre	720	25,000	2
	Diciembre	744	8,000	0
Año de Estudio 2024		<i>Datos de Falla</i>		
Equipo	Meses	Tiempo Operativo Hr/mes	Tiempo Inoperativo Hr/mes	Número de Fallos
VÁLVULA DE DIAFRAGMA 1	Enero	744	9,500	1
	Febrero	696	8,000	0
	Marzo	744	8,000	0
	Abril	720	8,000	0

11.6 Apéndice F. Medición de Indicadores de Desempeño KPIs de los Equipos

KPIs Sistema de Comunicación Radio UHF/VHF

En la tabla H1 se analizó los KPIs del equipo. En la gráfica F1 se muestra el análisis gráfico de la confiabilidad y de la mantenibilidad del equipo. Los cálculos de la Mantenibilidad y Disponibilidad se plasman en la tabla F2.

Tabla F1

KPIs Sistema de comunicación radio UHF/VHF (Fuente los Autores)

<i>KPIs 2021</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	368,92	372,00	3,08	99,17%
Febrero	672,00	672,00	0,00	100,00%
Marzo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Abril	720,00	720,00	0,00	100,00%
Mayo	739,50	744,00	4,50	99,40%
Junio	720,00	720,00	0,00	100,00%
Julio	740,00	744,00	4,00	99,46%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Octubre	744,00	744,00	0,00	100,00%
Noviembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Diciembre	744,00	744,00	0,00	100,00%
<i>KPIs 2022</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	672,00	672,00	0,00	100,00%
Marzo	734,70	744,00	9,30	98,75%
Abril	355,67	360,00	4,33	98,80%
Mayo	741,63	744,00	2,37	99,68%
Junio	231,84	240,00	8,16	96,60%
Julio	370,21	372,00	1,79	99,52%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	355,26	360,00	4,74	98,68%
Octubre	241,69	248,00	6,31	97,46%
Noviembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Diciembre	740,00	744,00	4,00	99,46%
<i>KPIs 2023</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	742,17	744,00	1,83	99,75%
Febrero	672,00	672,00	0,00	100,00%

Marzo	742,00	744,00	2,00	99,73%
Abril	358,50	360,00	1,50	99,58%
Mayo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Junio	720,00	720,00	0,00	100,00%
Julio	744,00	744,00	0,00	100,00%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Octubre	744,00	744,00	0,00	100,00%
Noviembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Diciembre	744,00	744,00	0,00	100,00%

KPIs 2024

Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	696,00	696,00	0,00	100,00%
Marzo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Abril	720,00	720,00	0,00	100,00%

Nota. La medición de KPIs es necesario para realizar el análisis de CMD.

Tabla F2

Confiabilidad y Mantenibilidad sistema de comunicación radio UHF/VHF

<i>t</i>	Tiempo	RM(<i>t</i>)	<i>X</i>	<i>Y</i>
1	231,84	0,017	5,446	-4,047
2	241,69	0,042	5,488	-3,147
3	355,26	0,067	5,873	-2,671
4	355,67	0,092	5,874	-2,343
5	358,50	0,116	5,882	-2,090
6	368,92	0,141	5,911	-1,883
7	370,21	0,166	5,914	-1,707
8	672,00	0,191	6,510	-1,554
9	672,00	0,215	6,510	-1,417
10	672,00	0,240	6,510	-1,293
11	696,00	0,265	6,545	-1,179
12	720,00	0,290	6,579	-1,073
13	720,00	0,314	6,579	-0,974
14	720,00	0,339	6,579	-0,881
15	720,00	0,364	6,579	-0,793
16	720,00	0,389	6,579	-0,709
17	720,00	0,413	6,579	-0,629
18	720,00	0,438	6,579	-0,551
19	720,00	0,463	6,579	-0,476

20	720,00	0,488	6,579	-0,402
21	734,70	0,512	6,599	-0,331
22	739,50	0,537	6,606	-0,261
23	740,00	0,562	6,607	-0,192
24	740,00	0,587	6,607	-0,124
25	741,63	0,611	6,609	-0,056
26	742,00	0,636	6,609	0,011
27	742,17	0,661	6,610	0,078
28	744,00	0,686	6,612	0,146
29	744,00	0,710	6,612	0,214
30	744,00	0,735	6,612	0,284
31	744,00	0,760	6,612	0,355
32	744,00	0,785	6,612	0,429
33	744,00	0,809	6,612	0,505
34	744,00	0,834	6,612	0,586
35	744,00	0,859	6,612	0,672
36	744,00	0,884	6,612	0,766
37	744,00	0,908	6,612	0,872
38	744,00	0,933	6,612	0,995
39	744,00	0,958	6,612	1,153
40	744,00	0,983	6,612	1,400

WEIBULL

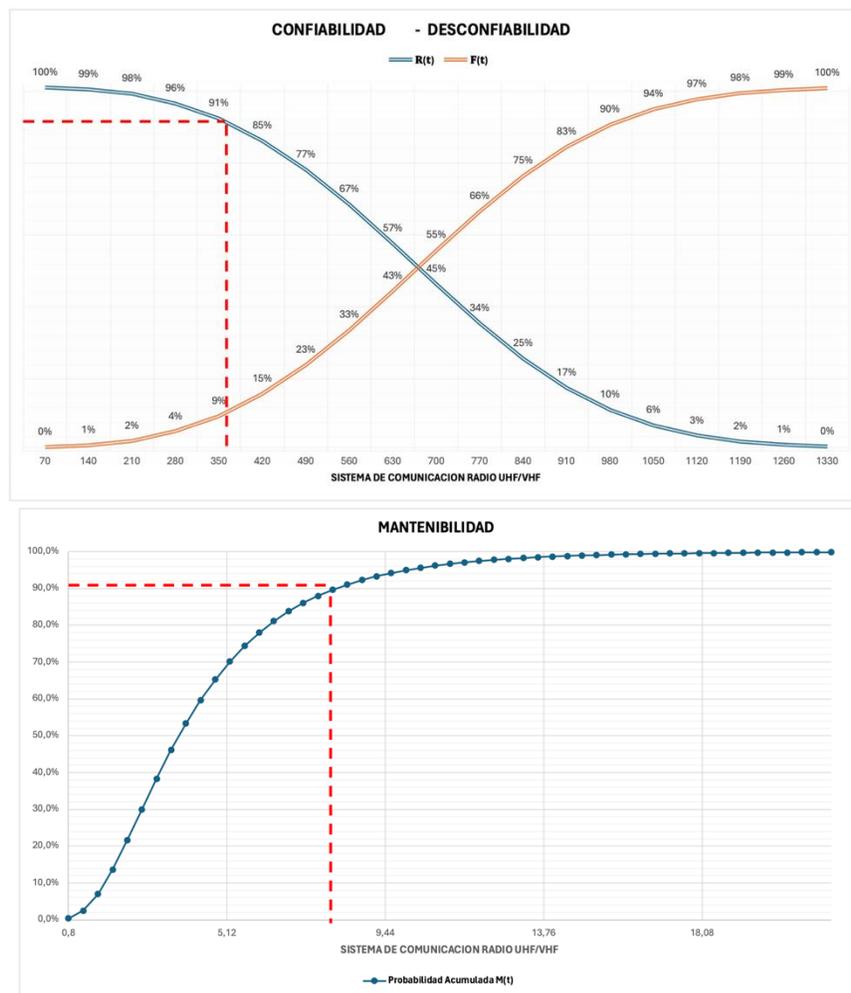
Tiempos	R(t)	Densidad	Tasa de Fallas	F(t)
70	100%	2,67924E-05	2,68085E-05	0%
140	99%	0,000115882	0,000116489	1%
210	98%	0,000270057	0,000275105	2%
280	96%	0,000483689	0,000506172	4%
350	91%	0,000741503	0,000812255	9%
420	85%	0,001017684	0,001195396	15%
490	77%	0,001277444	0,0016573	23%
560	67%	0,001481949	0,002199435	33%
630	57%	0,00159629	0,002823095	43%
700	45%	0,001598609	0,003529437	55%
770	34%	0,00148723	0,00431951	66%
840	25%	0,001282543	0,005194273	75%
910	17%	0,001022019	0,006154613	83%
980	10%	0,000749683	0,007201352	90%
1050	6%	0,000504014	0,008335259	94%

1120	3%	0,000309103	0,009557055	97%
1190	2%	0,000172057	0,010867422	98%
1260	1%	8,6469E-05	0,012267003	99%
1330	0%	3,90204E-05	0,013756409	100%

Nota. Para determinar cuándo (tiempo) es necesario realizar alguna acción o tarea de mantenimiento es importante predecir cuando baja la confiabilidad al 85%.

Figura F1

Confiabilidad y Mantenibilidad Sistema de comunicación radio UHF/VHF (Fuente los Autores)



Nota. De acuerdo a la gráfica para mantener la Confiabilidad al 90% se debe hacer alguna acción de mantenimiento a las 350 Horas y el tiempo de Mantenibilidad al 90% es de 8,4 Horas.

KPIs Switch de Comunicaciones

En la tabla F3 se analizó los KPIs del equipo. En la gráfica F2 se muestra el análisis gráfico de la confiabilidad y de la mantenibilidad del equipo. Los cálculos de la Mantenibilidad y Disponibilidad se plasman en la tabla F4.

Tabla F3

KPIs switch de comunicaciones (Fuente los Autores)

<i>KPIs 2021</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	672,00	672,00	0,00	100,00%
Marzo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Abril	720,00	720,00	0,00	100,00%
Mayo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Junio	720,00	720,00	0,00	100,00%
Julio	744,00	744,00	0,00	100,00%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Octubre	744,00	744,00	0,00	100,00%
Noviembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Diciembre	744,00	744,00	0,00	100,00%
<i>KPIs 2022</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	672,00	672,00	0,00	100,00%
Marzo	738,75	744,00	5,25	99,29%
Abril	720,00	720,00	0,00	100,00%
Mayo	242,84	248,00	5,16	97,92%
Junio	171,65	180,00	8,35	95,36%
Julio	741,25	744,00	2,75	99,63%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Octubre	737,27	744,00	6,73	99,09%
Noviembre	717,50	720,00	2,50	99,65%
Diciembre	744,00	744,00	0,00	100,00%
<i>KPIs 2023</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	330,96	336,00	5,04	98,50%
Marzo	744,00	744,00	0,00	100,00%
Abril	714,50	720,00	5,50	99,24%
Mayo	744,00	744,00	0,00	100,00%

Junio	720,00	720,00	0,00	100,00%
Julio	744,00	744,00	0,00	100,00%
Agosto	744,00	744,00	0,00	100,00%
Septiembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Octubre	744,00	744,00	0,00	100,00%
Noviembre	720,00	720,00	0,00	100,00%
Diciembre	744,00	744,00	0,00	100,00%
KPIs 2024				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	0,00	100,00%
Febrero	696,00	696,00	0,00	100,00%
Marzo	741,00	744,00	3,00	99,60%
Abril	720,00	720,00	0,00	100,00%

Nota. La medición de KPIs es necesario para realizar el análisis de CMD.

Tabla F4

Confiabilidad y Mantenibilidad switch de comunicaciones

i	Tiempo	RM(t)	X	Y
1	171,65	0,017	5,145	-4,047
2	242,84	0,042	5,492	-3,147
3	330,96	0,067	5,802	-2,671
4	672,00	0,092	6,510	-2,343
5	672,00	0,116	6,510	-2,090
6	696,00	0,141	6,545	-1,883
7	714,50	0,166	6,572	-1,707
8	717,50	0,191	6,576	-1,554
9	720,00	0,215	6,579	-1,417
10	720,00	0,240	6,579	-1,293
11	720,00	0,265	6,579	-1,179
12	720,00	0,290	6,579	-1,073
13	720,00	0,314	6,579	-0,974
14	720,00	0,339	6,579	-0,881
15	720,00	0,364	6,579	-0,793
16	720,00	0,389	6,579	-0,709
17	720,00	0,413	6,579	-0,629
18	720,00	0,438	6,579	-0,551
19	737,27	0,463	6,603	-0,476
20	738,75	0,488	6,605	-0,402
21	741,00	0,512	6,608	-0,331

22	741,25	0,537	6,608	-0,261
23	744,00	0,562	6,612	-0,192
24	744,00	0,587	6,612	-0,124
25	744,00	0,611	6,612	-0,056
26	744,00	0,636	6,612	0,011
27	744,00	0,661	6,612	0,078
28	744,00	0,686	6,612	0,146
29	744,00	0,710	6,612	0,214
30	744,00	0,735	6,612	0,284
31	744,00	0,760	6,612	0,355
32	744,00	0,785	6,612	0,429
33	744,00	0,809	6,612	0,505
34	744,00	0,834	6,612	0,586
35	744,00	0,859	6,612	0,672
36	744,00	0,884	6,612	0,766
37	744,00	0,908	6,612	0,872
38	744,00	0,933	6,612	0,995
39	744,00	0,958	6,612	1,153
40	744,00	0,983	6,612	1,400

WEIBULL

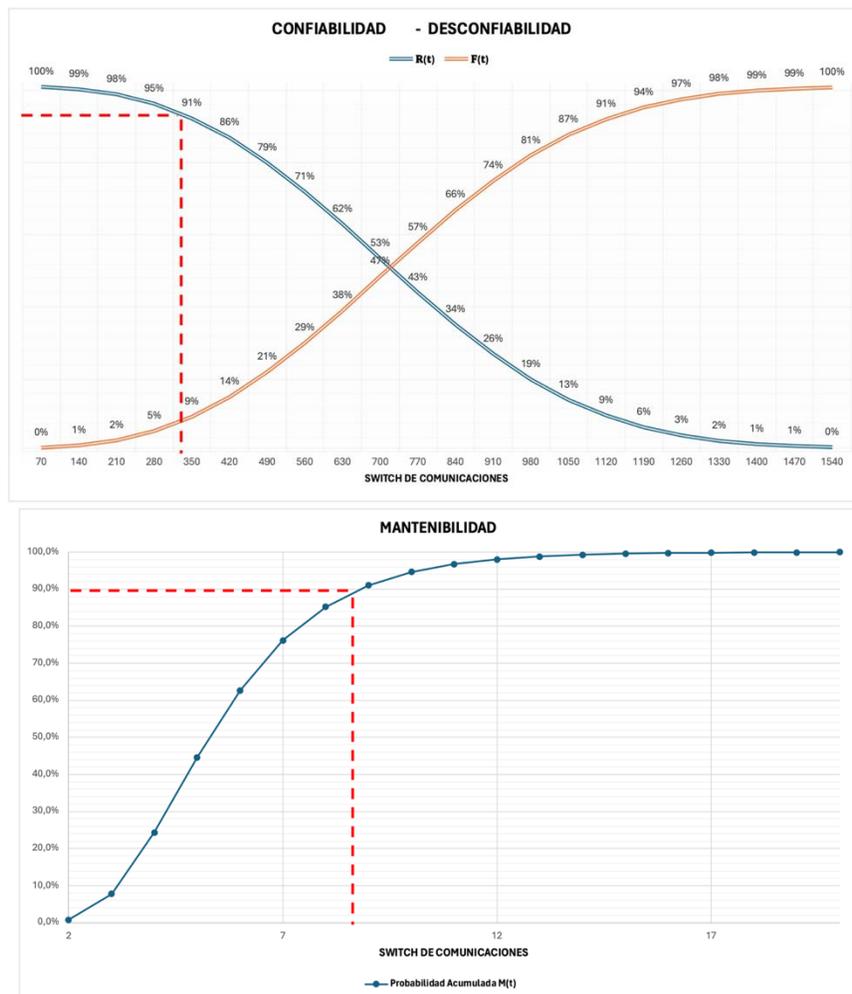
Tiempos	R(t)	Densidad	Tasa de Fallas	F(t)
70	100%	3,95632E-05	3,96022E-05	0%
140	99%	0,000138382	0,000139345	1%
210	98%	0,000284625	0,000290868	2%
280	95%	0,000466961	0,000490299	5%
350	91%	0,000670901	0,000735111	9%
420	86%	0,000878518	0,001023451	14%
490	79%	0,001069617	0,001353866	21%
560	71%	0,001224007	0,001725168	29%
630	62%	0,001324431	0,002136355	38%
700	53%	0,001359526	0,002586565	47%
770	43%	0,00132603	0,003075044	57%
840	34%	0,001229573	0,003601121	66%
910	26%	0,001083691	0,004164195	74%
980	19%	0,000907205	0,004763722	81%
1050	13%	0,000720609	0,005399204	87%
1120	9%	0,000542404	0,006070186	91%
1190	6%	0,000386304	0,006776246	94%

1260	3%	0,000259902	0,007516991	97%
1330	2%	0,000164897	0,008292058	98%
1400	1%	9,848E-05	0,009101104	99%
1470	1%	5,5259E-05	0,009943808	99%
1540	0%	2,90765E-05	0,010819868	100%

Nota. Para determinar cuándo (tiempo) es necesario realizar alguna acción o tarea de mantenimiento es importante predecir cuando baja la confiabilidad al 85%.

Figura F2

Confiabilidad y Mantenibilidad switch de comunicaciones (Fuente los Autores)



Nota. De acuerdo a la gráfica para mantener la Confiabilidad al 90% se debe hacer alguna acción de mantenimiento a las 350 Horas y el tiempo de Mantenibilidad al 90% es de 9 Horas.

KPIs Válvula de Diafragma 1

En la tabla F5 se analizó los KPIs del equipo. En la gráfica F3 se muestra el análisis gráfico de la confiabilidad y de la mantenibilidad del equipo. Los cálculos de la Mantenibilidad y Disponibilidad se plasman en la tabla F6.

Tabla F5

KPIs válvula de diafragma 1 (Fuente los Autores)

<i>KPIs 2021</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	8,00	98,94%
Febrero	672,00	672,00	8,00	98,82%
Marzo	744,00	744,00	8,00	98,94%
Abril	704,33	720,00	15,67	97,82%
Mayo	732,00	744,00	12,00	98,39%
Junio	698,33	720,00	21,67	96,99%
Julio	744,00	744,00	8,00	98,94%
Agosto	744,00	744,00	8,00	98,94%
Septiembre	352,00	360,00	8,00	97,78%
Octubre	744,00	744,00	8,00	98,94%
Noviembre	720,00	720,00	8,00	98,90%
Diciembre	744,00	744,00	8,00	98,94%
<i>KPIs 2022</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	8,00	98,94%
Febrero	672,00	672,00	8,00	98,82%
Marzo	744,00	744,00	8,00	98,94%
Abril	720,00	720,00	8,00	98,90%
Mayo	744,00	744,00	8,00	98,94%
Junio	720,00	720,00	8,00	98,90%
Julio	744,00	744,00	8,00	98,94%
Agosto	733,00	744,00	11,00	98,52%
Septiembre	351,08	360,00	8,92	97,52%
Octubre	744,00	744,00	8,00	98,94%
Noviembre	720,00	720,00	8,00	98,90%
Diciembre	724,50	744,00	19,50	97,38%
<i>KPIs 2023</i>				
Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	744,00	744,00	8,00	98,94%

Febrero	672,00	672,00	8,00	98,82%
Marzo	744,00	744,00	8,00	98,94%
Abril	720,00	720,00	8,00	98,90%
Mayo	744,00	744,00	8,00	98,94%
Junio	720,00	720,00	8,00	98,90%
Julio	744,00	744,00	8,00	98,94%
Agosto	733,00	744,00	11,00	98,52%
Septiembre	720,00	720,00	8,00	98,90%
Octubre	730,00	744,00	14,00	98,12%
Noviembre	347,50	360,00	12,50	96,53%
Diciembre	744,00	744,00	8,00	98,94%

KPIs 2024

Meses	MTBF (Hr/Fallas)	MTTF(Hr/Fallas)	MTTR (Hr/Fallas)	Disponibilidad de Operaciones
Enero	734,50	744,00	9,50	98,72%
Febrero	696,00	696,00	8,00	98,86%
Marzo	744,00	744,00	8,00	98,94%
Abril	720,00	720,00	8,00	98,90%

Nota. La medición de KPIs es necesario para realizar el análisis de CMD.

Tabla F6

Confiabilidad y Mantenibilidad válvula de diafragma 1

<i>i</i>	Tiempo	RM(t)	X	Y
1	347,50	0,017	5,851	-4,047
2	351,08	0,042	5,861	-3,147
3	352,00	0,067	5,864	-2,671
4	672,00	0,092	6,510	-2,343
5	672,00	0,116	6,510	-2,090
6	672,00	0,141	6,510	-1,883
7	696,00	0,166	6,545	-1,707
8	698,33	0,191	6,549	-1,554
9	704,33	0,215	6,557	-1,417
10	720,00	0,240	6,579	-1,293
11	720,00	0,265	6,579	-1,179
12	720,00	0,290	6,579	-1,073
13	720,00	0,314	6,579	-0,974
14	720,00	0,339	6,579	-0,881
15	720,00	0,364	6,579	-0,793
16	720,00	0,389	6,579	-0,709
17	720,00	0,413	6,579	-0,629
18	724,50	0,438	6,585	-0,551

19	730,00	0,463	6,593	-0,476
20	732,00	0,488	6,596	-0,402
21	733,00	0,512	6,597	-0,331
22	733,00	0,537	6,597	-0,261
23	734,50	0,562	6,599	-0,192
24	744,00	0,587	6,612	-0,124
25	744,00	0,611	6,612	-0,056
26	744,00	0,636	6,612	0,011
27	744,00	0,661	6,612	0,078
28	744,00	0,686	6,612	0,146
29	744,00	0,710	6,612	0,214
30	744,00	0,735	6,612	0,284
31	744,00	0,760	6,612	0,355
32	744,00	0,785	6,612	0,429
33	744,00	0,809	6,612	0,505
34	744,00	0,834	6,612	0,586
35	744,00	0,859	6,612	0,672
36	744,00	0,884	6,612	0,766
37	744,00	0,908	6,612	0,872
38	744,00	0,933	6,612	0,995
39	744,00	0,958	6,612	1,153
40	744,00	0,983	6,612	1,400

WEIBULL

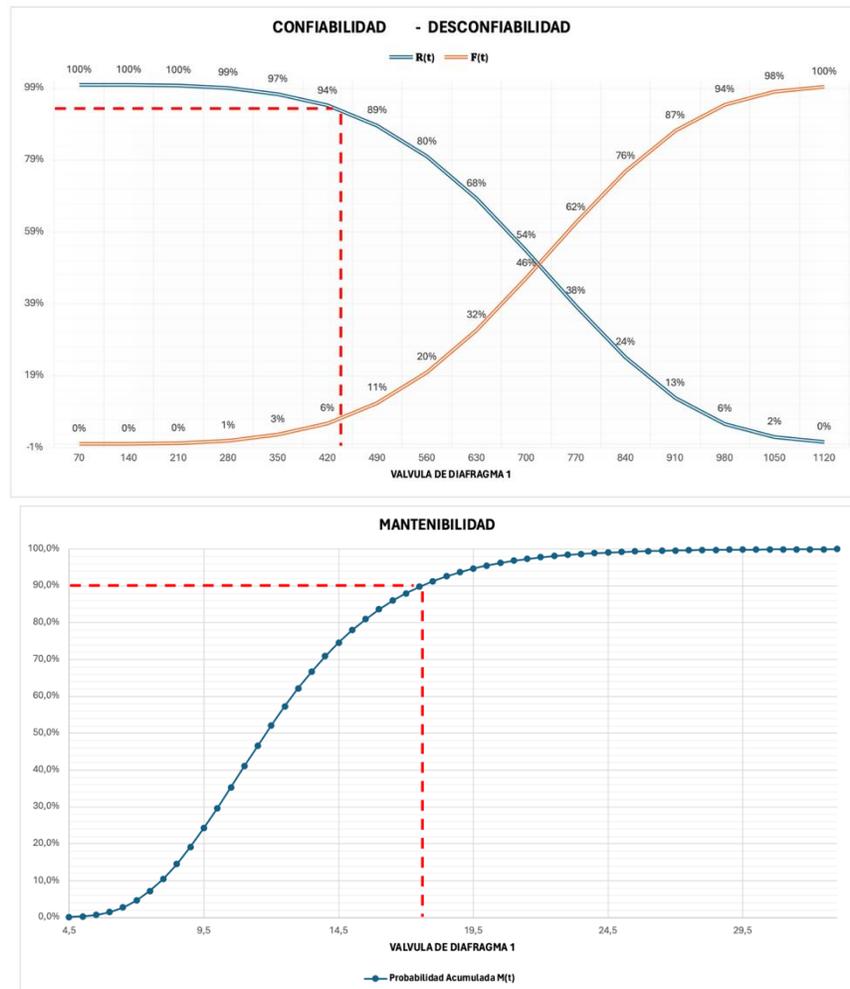
Tiempos	R(t)	Densidad	Tasa de Fallas	F(t)
70	100%	1,07647E-06	1,07649E-06	0%
140	100%	1,28212E-05	1,28263E-05	0%
210	100%	5,45111E-05	5,4648E-05	0%
280	99%	0,000151402	0,000152825	1%
350	97%	0,000330631	0,000339326	3%
420	94%	0,000613345	0,000651129	6%
490	89%	0,001000987	0,001129749	11%
560	80%	0,001457073	0,001820899	20%
630	68%	0,001893299	0,002774219	32%
700	54%	0,002177878	0,00404306	46%
770	38%	0,002183532	0,005684296	62%
840	24%	0,001866757	0,007758174	76%
910	13%	0,001323651	0,010328177	87%
980	6%	0,000752897	0,013460907	94%

1050	2%	0,000330436	0,017225978	98%
1120	0%	0,000107038	0,021695928	100%

Nota. Para determinar cuándo (tiempo) es necesario realizar alguna acción o tarea de mantenimiento es importante predecir cuando baja la confiabilidad al 85%.

Figura F6

Confiabilidad y Mantenibilidad válvula de diafragma 1 (Fuente los Autores)



Nota. De acuerdo a la gráfica para mantener la Confiabilidad al 90% se debe hacer alguna acción de mantenimiento a las 400 Horas y el tiempo de Mantenibilidad al 90% es de 17 Horas.

11.7 Apéndice G. Tablas para el Análisis de Criticidad

Tabla G1

Datos prestación del servicio EBAP Cantalejo (Fuente los Autores)

DATOS DE LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO Estación de bombeo Cantalejo		
Capacidad de Bombeo Nominal	140	(l/s)
Capacidad de Bombeo Actual	130	(l/s)
Precio (l/s)	3.100	\$

Tabla G2

Frecuencia de ocurrencia de falla (Fuente los Autores)

TABLA DE INDICADOR DE SEVERIDAD DE FRECUENCIA	
Frecuencia de ocurrencia de falla	
Semanal	5
Mensual	4
Trimestral	3
Semestral	2
Anual	1

Tabla G3

Indicador de impacto en la no prestación del servicio (Fuente Autores)

TABLA DE INDICADOR DE IMPACTO EN LA NO PRESTACIÓN DEL EL SERVICIO	
PORCENTAJE SIN SERVICIO	HORAS SIN BOMBEO
20%	Si es $\leq 4,8$
40%	Si es $\geq 4,8$ y si es $\leq 9,6$
60%	Si es $\geq 9,6$ y si es $\leq 14,4$
80%	Si es $\geq 14,4$ y si es $\leq 19,2$
100%	Si es $\geq 19,2$

Tabla G4

Indicador de severidad de consecuencias (Fuente los Autores)

TABLA DE INDICADOR DE SEVERIDAD DE CONSECUENCIAS					
Indicador	Impacto a la Seguridad ¿En el evento ocurrió?	Impacto al Medio Ambiente ¿En el evento ocurrió?	Pérdida en el Servicio	Costos de Reparación	Indicador
5	Accidente con fatalidades múltiples	Daño medioambiental severo y de largo plazo (de 5 o más años)	Pérdida del servicio mayor o igual 85 (l/s)	Costos de reparación > 5.000.000 \$	5
4	Accidente con una fatalidad	Daño medioambiental de largo plazo (de 5 o 3 años)	Pérdida del servicio entre 57 (l/s) y 84 (l/s)	Costos de reparación < 4.999.999 \$ y > 2.000.000 \$	4
3	Accidente con discapacidad permanente	Daño medioambiental de corto plazo (de 3 o 1 años)	Pérdida del servicio entre 29 (l/s) y 56 (l/s)	Costos de reparación < 2.999.999 \$ y > 1.999.999 \$	3
2	Accidente con tiempo perdido	Daño medioambiental menor (menor a 1 años)	Pérdida del servicio entre 0 y 28 (l/s)	Costos de reparación 1.999.999 \$ <\$ y 900.000> \$	2
1	Sin Accidentes a personas	Sin daño al medio ambiente	Sin Pérdida en el servicio	Costos de reparación 0 < 900.000 \$	1

Figura G1

Análisis de criticidad (Fuente los Autores)

ANÁLISIS DE CRITICIDAD																			
UNIDAD:		Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - DSE		SISTEMA:		EB-AC-RM-C210-BCAN		FECHA: 13/04/24											
DATOS DEL EQUIPO				OPERACIÓN									CONSECUENCIA (Indicador de Impacto)					FRECUENCIA (Indicador)	RESULTADO
#	Estación de Bombeo Paraíso 1	Número de Equipos	TAG	Datos de Falla			Impacto en la prestación del servicio						Impacto en Seguridad	Impacto al Medio Ambiente	Pérdidas en la Prestación del Servicio	Costos de Reparación	Σ Consecuencia	Frecuencia	CRITICIDAD
				Cant. de Fallas periodo 01-01-2021 al 31-03-2024	Duración de Fallas periodo 01-01-2021 al 31-03-2024	Costo de Reparación	Tiene Respaldo	Impacto en el servicio (%)	Duración del Paro (h)	Pérdida en el Bombeo (l/s)	Costo de bombeo Perdido (PESOS)								
				#	hrs	PESOS	S/N	(%)	(l/s)	(h)	(l/s)	PESOS							
1	SISTEMA DE COMUNICACIÓN RADIO UHF/VHF	1	TCRU077001	23	102	\$10.350.000,00	S	60%	78	4,43	346	\$1.072.330,43	1	1	5	5	12	4	48
2	PLC DE SISTEMAS DE CONTROL Y SCADA	1	CLLC077001	20	94	\$9.000.000,00	N	100%	130	4,70	611	\$1.894.100,00	1	5	5	5	16	4	64
3	SWITCH DE COMUNICACIONES	1	TCSW077001	15	85	\$6.750.000,00	S	60%	78	5,67	442	\$1.370.200,00	1	1	5	5	12	2	24
4	VÁLVULA DE DIAFRAGMA 1	1	VADB077001	14	85	\$6.300.000,00	N	100%	130	6,07	789	\$2.446.785,71	1	5	5	5	16	2	32

11.8 Apéndice H. Resultados Fiabilidad del Instrumento

Tabla H1

Fiabilidad del instrumento (Fuente los Autores)

FIABILIDAD DEL INSTRUMENTO

Encuesta de Satisfacción Para una Propuesta de un Plan de Mantenimiento de RCM
(Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad)

Encuestados	Ítems											Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	5	1	5	4	4	4	5	3	2	4	5	42
2	4	3	3	4	4	5	4	4	4	4	4	43
3	4	1	5	5	4	5	5	4	2	5	5	45
4	5	3	5	5	5	5	4	4	3	4	4	47
5	5	4	5	5	5	5	5	5	4	4	4	51
6	4	1	5	5	5	5	5	5	3	5	5	48
7	5	5	3	3	5	5	5	3	5	3	4	46
8	5	2	4	4	5	4	4	4	2	4	4	42
9	5	3	5	5	5	5	1	1	5	1	5	41
10	5	2	4	5	5	5	4	4	5	4	5	48
11	4	2	4	4	4	4	4	4	3	3	4	40
12	5	3	5	5	5	5	5	5	3	4	5	50
13	4	2	5	4	4	5	5	5	5	5	5	49
14	4	1	5	5	5	5	5	2	4	4	3	43
15	3	5	3	4	5	5	5	4	5	1	3	43
16	5	1	5	5	5	5	5	5	2	2	5	45
17	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	51
18	5	3	5	5	5	5	5	5	5	3	5	51
19	5	1	5	5	5	5	5	5	2	5	5	48
20	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	55
21	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	4	52
22	5	1	5	5	5	5	4	3	4	3	5	45
23	5	2	5	5	5	4	4	4	4	3	4	45
24	1	3	1	1	2	1	2	2	1	2	1	17
25	4	2	4	4	4	4	4	4	4	5	4	43
26	5	2	5	5	5	4	4	4	3	3	4	44
27	5	3	5	5	5	5	3	3	5	5	3	47

28	4	2	4	3	4	5	4	4	4	4	4	42
29	5	3	5	5	5	5	3	5	3	3	4	46
30	5	4	5	5	5	5	5	4	4	3	5	50
31	5	2	5	5	5	5	5	5	5	4	4	50
32	5	1	5	5	5	5	5	4	1	2	5	43
33	4	2	5	5	4	4	4	3	2	5	5	43
34	4	2	5	5	4	3	5	4	2	3	4	41
35	4	2	4	4	4	4	4	4	2	2	4	38
Varianza	0,65	1,56	0,76	0,71	0,40	0,64	0,85	0,97	1,62	1,38	0,72	
Σ Varianza	10,26											
Varianza Total del Instrumento	37,91											

11.9 Apéndice I. Estadística Descriptiva del Instrumento

Figura I1

Análisis estadística descriptiva ítem 1 (Fuente los Autores)

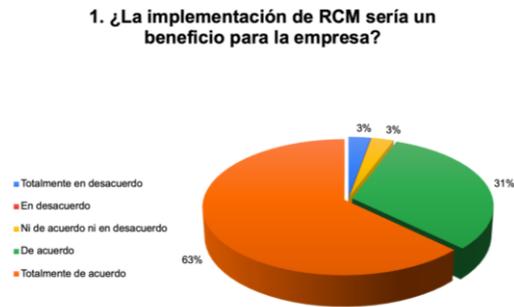


Tabla I1

Análisis estadística descriptiva ítem 1 (Fuente los Autores)

Ítem 1			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	1	2,9%
En desacuerdo	2	0	0,0%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	1	2,9%
De acuerdo	4	11	31,4%
Totalmente de acuerdo	5	22	62,9%

Figura I2

Análisis estadística descriptiva ítem 3 (Fuente los Autores)



Tabla I2

Análisis estadística descriptiva ítem 3 (Fuente los Autores)

Ítem 3			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	1	2,9%
En desacuerdo	2	0	0,0%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	3	8,6%
De acuerdo	4	6	17,1%
Totalmente de acuerdo	5	25	71,4%

Figura I3

Análisis estadística descriptiva ítem 4 (Fuente los Autores)



Tabla I3

Análisis estadística descriptiva ítem 4 (Fuente los Autores)

Ítem 4			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	1	2,9%
En desacuerdo	2	0	0,0%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	2	5,7%
De acuerdo	4	8	22,9%
Totalmente de acuerdo	5	24	68,6%

Figura I4

Análisis estadística descriptiva ítem 5 (Fuente los Autores)

5. ¿Reducir la tasa de fallas de los equipos mejoraría el tiempo para realizar sus actividades de mantenimiento programadas?

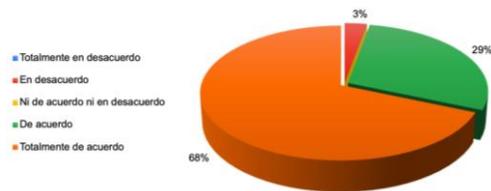


Tabla I4

Análisis estadística descriptiva ítem 5 (Fuente los Autores)

Ítem 5			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	0	0,0%
En desacuerdo	2	1	2,9%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	0	0,0%
De acuerdo	4	10	28,6%
Totalmente de acuerdo	5	24	68,6%

Figura I5

Análisis estadística descriptiva ítem 6 (Fuente los Autores)

6. ¿Considera que para reducir los tiempos de reparación de los equipos es necesario el acceso rápido a repuestos y herramientas?

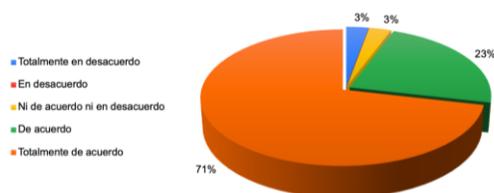


Tabla I5

Análisis estadística descriptiva ítem 6 (Fuente los Autores)

Ítem 6			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	1	2,9%
En desacuerdo	2	0	0,0%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	1	2,9%

De acuerdo	4	8	22,9%
Totalmente de acuerdo	5	25	71,4%

Figura I6

Análisis estadística descriptiva ítem 7 (Fuente los Autores)



Tabla I6

Análisis estadística descriptiva ítem 7 (Fuente los Autores)

Ítem 7			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	1	2,9%
En desacuerdo	2	1	2,9%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	2	5,7%
De acuerdo	4	12	34,3%
Totalmente de acuerdo	5	19	54,3%

Figura I7

Análisis estadística descriptiva ítem 11 (Fuente los Autores)

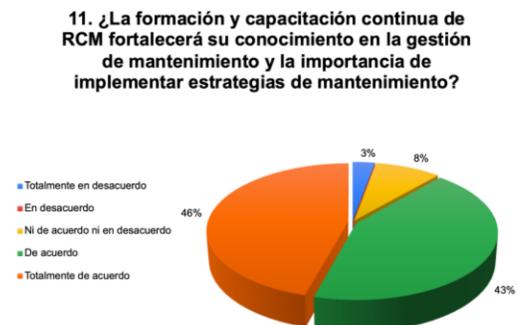


Tabla I7

Análisis estadística descriptiva ítem 11 (Fuente los Autores)

Ítem 11			
Escala	No.	Cantidad de datos	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	1	1	2,9%
En desacuerdo	2	0	0,0%
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3	3	8,6%
De acuerdo	4	15	42,9%
Totalmente de acuerdo	5	16	45,7%

11.10 Apéndice J. Diagramas de Gantt

Figura J1

Diagrama de Gantt Plan de Capacitación RCM (Fuente los Autores)



Figura J2

Diagrama de Gantt Plan de Mantenimiento RCM para el PLC (Fuente los Autores)

