

UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA JOSÉ SIMEÓN CAÑAS

UNIVERSIDAD DON BOSCO



**“PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL
MANTENIMIENTO DE UNA ESTACIÓN DE BOMBEO DE AGUA
POTABLE”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO PARA LA FACULTAD DE
POSTGRADOS UCA**

Y

FACULTAD DE INGENIERÍA UDB.

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTOR:

CRISTIAN ALBERTO MIRANDA GARCÍA

ASESOR:

VALERIANO VLADIMIR VALDÉZ GALICIA

ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A.

JULIO 2021

Rectores

Andreu Oliva de la Esperanza, S.J.

Mario Rafael Olmos Argueta, SDB.

Secretarias Generales

Silvia Elinor Azucena de Fernández

Yesenia Xiomara Martínez Oviedo

Decana de Postgrados UCA

Nelly Arely Chévez Reynosa

Decano Facultad de Ingeniería

Mario Guillermo Juárez Pérez

Directores de la Maestría en Gerencia de Mantenimiento Industrial

Laura Beatriz Orellana UCA

José Luis Martínez UDB

Director de Tesis

Valeriano Vladimir Valdez Galicia

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a Dios todo poderoso por escuchar mis suplicas y permitirme la oportunidad de iniciar y finalizar esta nueva etapa de preparación académica en mi vida, gracias por proporcionarme la capacidad física e intelectual para culminar con éxito este proceso que requirió de mucho sacrificio, esfuerzo y entrega.

Gracias a mi madre por desear y anhelar siempre lo mejor para mi vida, gracias por sus consejos y por cada una de sus palabras que me han guiado por el camino a través del cual he llegado hasta este momento de gran satisfacción y regocijo de mi vida.

Gracias a mi hijo Cristian Alberto Miranda por el amor, comprensión y apoyo incondicional que me brinda cada día.

Gracias a mi Esposa María Elena Castro, familia y amigos por el apoyo directo o indirecto que me brindaron.

Gracias a mi director de trabajo de graduación Ing. Valeriano Vladimir Valdez Galicia, por compartir sus conocimientos para que este trabajo sea un éxito.

Gracias a las Universidades UDB y UCA por tan importante aporte en la formación profesional de la presente maestría.

Gracias a los docentes que me impartieron las diferentes asignaturas de la maestría, pero en especial al PhD. MSc. Eng. Carlos Parra, quien me impartió la asignatura Análisis de Confiabilidad en el Mantenimiento Industrial, ya que me dio los principales conocimientos e información con los cuales he elaborado el presente trabajo.

Josué 1:9

Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará siempre contigo en dondequiera que vayas

DEDICATORIA

Dedico el esfuerzo del presente trabajo a Dios todo poderoso por darme la bendición de culminar este proceso de preparación en mi vida profesional que representa una nueva oportunidad de superación que traerá beneficios a mí y a mi familia. También dedico este triunfo a mi esposa María Elena Castro, que me ha apoyado incondicionalmente. Dedico este nuevo triunfo a mi madre que siempre ha confiado en mí, gracias a ella he salido adelante en todos mis triunfos académicos profesionales, a mi padre que ya no está conmigo físicamente, pero sé que se encuentra con nuestro creador regocijándose con este triunfo que es también el resultado de su esfuerzo, a mis sobrinos, a mis amigos quienes siempre tuvieron palabras de aliento para que siguiera adelante.

Indice

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIA	II
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS.....	VII
RESUMEN	1
1 OBJETIVOS Y ALCANCE.	2
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE.....	2
2 ANTECEDENTES.	3
2.1 Sistema electromecánico de bombeo.....	4
2.2 Sistema de potabilización.....	5
2.3 Sistema de distribución	5
3 FUNDAMENTACION TEORICA DE MANTENIMIENTO.	7
3.1 Mantenimiento centrado en fiabilidad RCM	7
3.1.1 Proceso de implementación del RCM	8
3.1.2 Formación del equipo natural de trabajo del RCM.....	9
3.2 Selección del sistema y definición del contexto operacional.....	10
3.3 Técnicas de análisis de criticidad aplicadas en el proceso de RCM	11
3.4 Análisis del contexto operacional	14
3.5 Desarrollo del análisis de Modos y Efectos de Fallos (AMEF)	16
3.5.1 AMEF. Definición de funciones y estándares de ejecución.....	17
3.5.2 AMEF. Definición de fallos funcionales	18
3.5.3 Definición de modos de fallos	18
3.5.4 AMEF. Definición de los efectos y consecuencias de los modos de fallos	19
3.6 Procesos de selección de las estrategias de mantenimiento (aplicación de árbol lógico de decisión del RCM).....	21
3.7 Actividades de mantenimiento preventivas (proactivas)	22
3.8 Actividades de mantenimiento correctivas (reactivas).....	24
4 APLICACIÓN DE RCM, AL PROCESO DE PRODUCCION DE AGUA DE LA ESTACION DE BOMBEO.....	25

4.1	ETAPA I: Contexto operacional actual de la estación de bombeo de agua potable	25
4.1.1	Detalle de equipos y componentes de los sistemas	28
4.1.2	Implementación de metodología de matriz de criticidad basada en el modelo de priorización por riesgo.	37
4.1.3	Análisis de Modos y Efectos de Fallos con datos registrados en un año en la estación de bombeo.	40
4.2	ETAPA II: Implementación de Análisis de Causa Raíz AMEF, dentro del marco del RCM	43
	CONCLUSIONES	50
	RECOMENDACIONES	52
	BIBLIOGRAFÍA	53
	ANEXOS	54

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Sistemas de una estación de bombeo para la producción de agua potable. (Autoría Propia)</i>	4
<i>Figura 2. Flujograma de implantación del mcc. (Parra, 2016)</i>	8
<i>Figura 3. Integrantes de un equipo natural de trabajo de rcm. (Parra C. &, 2016)</i>	9
<i>Figura 4. Representación genérica de la matriz de criticidad. (Parra, 2016)</i>	14
<i>Figura 5. Diagrama entrada proceso salida (eps). (Parra C. &, 2016)</i>	15
<i>Figura 6. Esquema de análisis de los modos y efectos de fallos. (Parra, 2016)</i>	16
<i>Figura 7. Diagrama para determinar consecuencias de modos de fallos. (Parra, 2016)</i>	21
<i>Figura 8. Lógica de la selección de estrategias de mantenimiento. (Parra, 2016)</i>	22
<i>Figura 9. Diagrama de entrada proceso salida. (Autoría Propia)</i>	28
<i>Figura 10. Subestación eléctrica de 300 kva. (Autoría Propia)</i>	29
<i>Figura 11. Gabinete de protección y control para motor de 200 hp. (Autoría Propia)</i>	30
<i>Figura 12. Perfil de pozo profundo. (Autoría Propia)</i>	31
<i>Figura 13. Motor eléctrico vertical de eje hueco de 200 hp. (Motors, 2006)</i>	32
<i>Figura 14. Tipos de cabezal de descarga. (Pump, 2021)</i>	33
<i>Figura 15. Bomba tipo turbina vertical y tubería de columna. (SENA, 2012)</i>	34
<i>Figura 16. Aparato hipoclorador. (Autoría Propia)</i>	35
<i>Figura 17. Equipos de rebombeo en tanque cisterna. (Autoría Propia)</i>	36
<i>Figura 18. Matriz de criticidad frecuencia vs consecuencia. (Parra, 2016)</i>	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de criticidad para la jerarquización de equipos.	39
Tabla 2.a Tabla de funciones y modos de fallos.	40
Tabla 2.b. Tabla de consecuencias por fallos.	41
Tabla 2.c. Tabla de Análisis Causa Raíz.	44
Tabla 3. Plan de mantenimiento propuesto.	46
Tabla 3. Plan de mantenimiento propuesto (Continuación).	47
Tabla 4. Tabla de consecuencias por fallos esperados después de aplicado el plan de mantenimiento.	48
Tabla 5. Indicador de ahorro potencial esperado después de implementar el RCM.	49

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

A	Amperios
AMEF	Análisis de modos y efectos de fallas
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association
BAR	Unidad de presión
CDT	Carga Dinámica Total
EPS	Entrada-Proceso-Salida
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
GPM	Galones por minuto
HP	Unidad de potencia (Horse Power) Caballos de potencia
Hz	Unidad de frecuencia (Hercio)
IP-CM	Impacto de Producción y/o Costos de Mantenimiento
IS	Impacto Social
KVA	Kilovoltio Amperio Unidad de Potencia aparente
m	Unidad de longitud metro
MCC	Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad
MGM	Modelo de gestión de mantenimiento
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
psi	Libra por pulgada cuadrada (pound per square inch)
psig	Gauge pound per square inch
PVC	Policloruro de Vinilo
RCM	Mantenimiento basado en la fiabilidad conocido por sus siglas en inglés (Reliability Centered Maintenance)
SHA	Seguridad-Higiene-Ambiente
V	Voltios

RESUMEN

El presente trabajo, está basado en la investigación para la implementación de un Sistema de gestión del mantenimiento industrial y su aplicación a una estación de bombeo para la producción de agua potable apta para el consumo humano utilizando la metodología del mantenimiento basado en fiabilidad, conocido comúnmente por sus siglas en inglés (RCM: *Reliability Centered Maintenance*), referenciado a la fase 4 del modelo de gestión de mantenimiento (MGM) propuesto por “Crespo y Parra 2012”. EL RCM más que una política de mantenimiento, es considerada una filosofía y su éxito radica en que propone un procedimiento que permite definir un programa de mantenimiento que se ajusta a las necesidades reales de los componentes principales de los sistemas de producción, tomando como base el nivel de riesgo que generan los diferentes tipos de fallas dentro de un determinado contexto operacional.

El tema de estudio tiene un fundamento teórico e investigativo aplicado al caso de una estación de bombeo de agua potable para el consumo humano, como las que existen en El Salvador, las cuales constan de un pozo profundo desde donde se bombea el agua de profundidades de hasta 250 m, hacia redes de distribución las cuales a través de tanques, tuberías y otros accesorios llevan el vital líquido hacia los consumidores que por lo general se encuentran delimitados geográficamente y solo pueden ser suministrados por un sistema en específico, y ya que el agua es considerada como un vital líquido para el desarrollo del ser humano, representa un gran reto para las administradoras de este servicio, el poderlo brindar con los dos principales requerimientos que exige el usuario los cuales son cantidad y calidad. El problema que ocasiona la falta de continuidad del agua suministrada, depende básicamente de fallas en los sistemas electromecánicos de los equipos de bombeo y en menor cuantía de la red de distribución, y los problemas ocasionados por la falta de calidad son más complejos y se deben principalmente a los tipos de aguas con las que se cuenta localmente ya que la mayoría dependen de acuíferos que por su naturaleza son de origen volcánica y poseen muchos componentes pesados que son perjudiciales para el consumo humano, pero también depende de los sistemas de potabilización con los que se cuente y del estado de las redes a través de las cuales se distribuye.

Para que la gestión del mantenimiento sea exitosa, esta debe de integrar una serie de estrategias alineadas con la misión de la empresa, para ello deberá considerar los factores claves que ayudaran a alcanzar los objetivos propuestos. Los principales factores son:

- La seguridad.
- El ambiente.
- Las operaciones.

1 OBJETIVOS Y ALCANCE.

1.1 OBJETIVO GENERAL.

- Elaborar un sistema de gestión de mantenimiento industrial en una estación de bombeo de agua potable para consumo humano, para minimizar el impacto causado por las fallas que provocan el paro funcional del sistema y la mala calidad del líquido.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Identificar el entorno operacional de los sistemas que intervienen en una estación de bombeo de agua potable para el consumo.
- Obtener un modelo de jerarquización de equipos o subsistemas basado en la evaluación de una matriz de criticidad por riesgo, como parte de la metodología RCM.
- Aplicar el análisis de modos y efectos de fallas (AMEF), como parte de la metodología RCM.
- Proponer una metodología basada en un procedimiento sistemático que permita realizar un plan óptimo de mantenimiento de acuerdo al entorno operacional del sistema de producción, considerando cumplir con los aspectos de seguridad, respeto por el medio ambiente y productividad.

1.3 ALCANCE.

- El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de una metodología para la gestión de mantenimiento en una estación de bombeo de agua potable para el consumo humano formada por tres sistemas principales, sistema electromecánico de bombeo y rebombeo, sistema bacteriológico para la potabilización y sistema de la red hidráulica de distribución.
- El presente trabajo se limitará a la aplicación de la metodología RCM como herramienta principal para la creación de un modelo de mantenimiento que resuelva el impacto negativo causado por las fallas dentro del entorno operativo específico.
- Este trabajo se limitará a la creación de un programa de mantenimiento basado en la metodología RCM, para los equipos electromecánicos que se encuentran en la Estación de Bombeo. Si este se desea implementar se deberá conocer el entorno operacional específico del sistema al que se aplicará.

2 ANTECEDENTES.

La explotación de los mantos acuíferos para la producción de agua apta para el consumo humano ha experimentado un gran cambio en las últimas décadas, impulsado por el crecimiento poblacional y la necesidad de contar con este recurso en cada uno de los hogares, tanto en poblaciones urbanas como rurales a lo largo y ancho de nuestro país, obligando a la inversión tanto pública como privada, a implementar sistemas de bombeos cuyo fin último es suplir con la demanda de agua tanto para uso doméstico como para consumo. Es de destacar que en muchos casos los sitios de extracción del agua están muy alejados de las poblaciones en donde se consume y son necesarias más de una estación de bombeo. Esta situación cada vez se vuelve más compleja ya que a medida pasa el tiempo la población sigue creciendo, ocasionando que las zonas de recarga hídrica de los mantos acuíferos cada vez sean menores, producto de la deforestación por el aumento desmedido del urbanismo. En la actualidad, las aguas de los mantos acuíferos se encuentran cada vez más profundas, y las pocas que se encuentran superficiales no son aptas para el consumo humano por el grado de contaminación que tienen, aunque no es imposible potabilizarla, requiere de una tecnología costosa económicamente hablando, por lo que la mayoría de sistemas se basan en la explotación de mantos acuíferos subterráneos por medio de la perforación de pozos profundos para bombear desde esos niveles el agua requerida.

Las estaciones de bombeo pueden variar un poco dependiendo de la profundidad del pozo y la distancia hasta donde se requiere distribuir el agua, más, sin embargo, en general constan de los siguientes subsistemas:

- Sistema electromecánico de bombeo
- Sistema de potabilización
- Sistema de distribución

Cada sistema tiene su contexto operacional específico y se integran para formar un solo proceso, pero debido a que poseen funciones específicas, los tipos o modos de falla también son específicos por lo que para poder garantizar la confiabilidad del sistema se necesita una herramienta metodológica que nos permita ajustar las acciones de control de fallos a su entorno operacional, esto a su vez permitirá identificar las necesidades reales de mantenimiento.

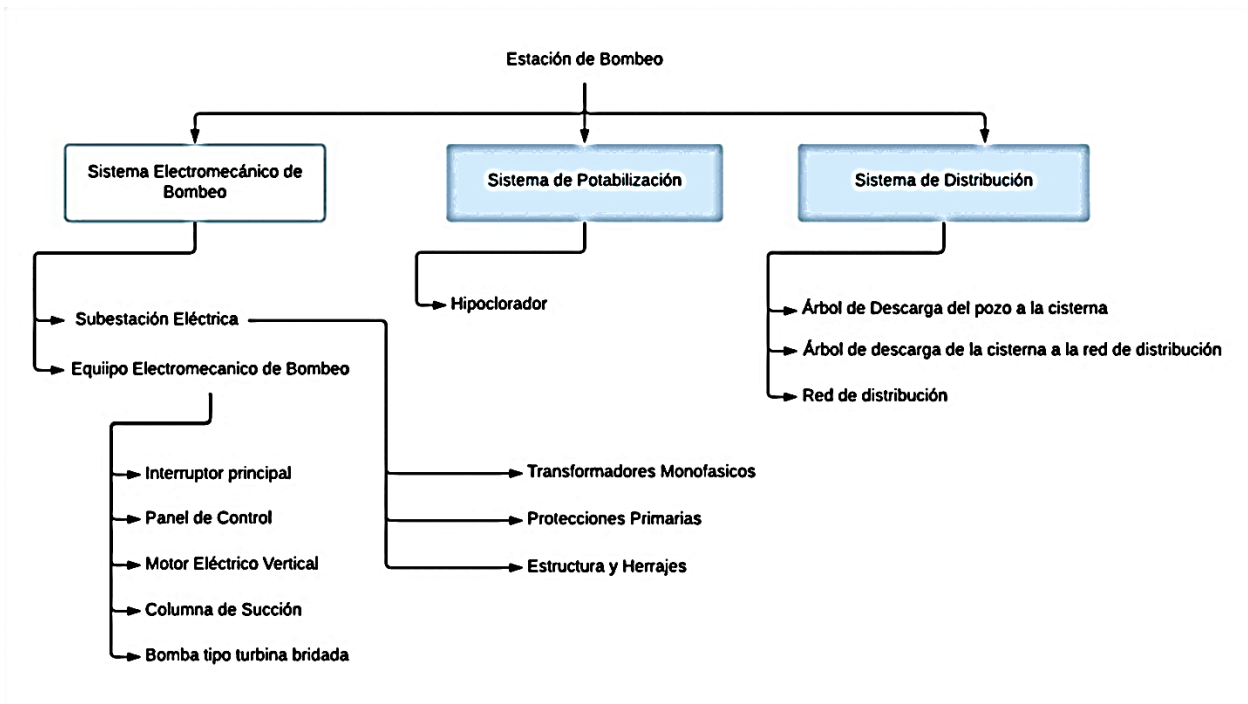


Figura 1. Sistemas de una estación de bombeo para la producción de agua potable. (Autoría propia).

2.1 Sistema electromecánico de bombeo

El proceso inicia con la explotación de un manto acuífero subterráneo a través de un pozo profundo, perforado y revestido con un ademe que permite tener acceso al reservorio subterráneo, con la disponibilidad de secciones de rejillas se filtra el agua de los niveles freáticos al interior del pozo.

Existen dos niveles de agua importantes a tomar en cuenta a la hora de explotación de un pozo profundo; uno es el nivel estático, que hace referencia al nivel de agua que se mantiene al interior cuando este está en condiciones de reposo, y el otro es el nivel dinámico que es el nivel que alcanza el agua cuando está en operación la bomba; otro parámetro no menos importante es el caudal de explotación, y el tiempo de recuperación que tiene el pozo.

El sistema electromecánico está formado por:

- **La Subestación Eléctrica**, cuya potencia instalada depende directamente de la cantidad de HP de los motores de las bombas instaladas (en pozo y en cisterna) y la operación de los equipos eléctricos en forma simultánea, en otras palabras, la carga trifásica y monofásica.
- **El Equipo de Bombeo**, el cual consta del conjunto Panel de control, Motor Eléctrico, Cabezal de descarga, Tubería de succión, Ejes de Columna, Porta cojinetes, y Bomba. Es importante aclarar que la cantidad de tubería depende de la profundidad del pozo y la ubicación de la cámara de succión de la bomba recomendada para la explotación del pozo.

2.2 Sistema de potabilización

Para depurar el agua, generalmente es preciso combinar varios tratamientos elementales, cuyas bases pueden ser físicas, químicas o biológicas, y cuyo efecto es eliminar en primer lugar las materias en suspensión, y las sustancias coloidales y finalmente las sustancias disueltas (minerales u orgánicas) para tener como producto final agua para consumo humano.

El método más común para la potabilización de las aguas subterráneas en el país es la cloración por medio de la aplicación de hipoclorito de calcio o ácido cloroisocianúrico, debido a que se pueden eliminar una gran cantidad de agentes patógenos. Las investigaciones del bacteriólogo Robert Koch demostró que el hipoclorito podía destruir cultivos puros de bacterias; sus observaciones aseguraban que las células bacterianas dosificadas con cloro liberan ácidos nucleicos, proteínas y potasio; y las funciones de la membrana resultaban afectadas por el cloro. La cloración permite el control de gusto y olores reduciéndolos, esto se debe a que el cloro oxida sustancias que se presentan naturalmente, específicamente a las secreciones de algas malolientes y olores de vegetación que se encuentran en proceso de descomposición.

La cloración lleva también un control biológico y químico, con respecto al primero su acción germicida elimina bacterias, mohos, y algas, controla los microorganismos. El control químico se encarga de destruir el sulfuro de hidrógeno y elimina el amoníaco como otros compuestos nitrogenados que generan sabores desagradables y obstaculizan cualquier tipo de desinfección.

Para la cloración del agua se utiliza un Hipoclorador con agitador, tinaco plástico y estructura metálica y kit de accesorios de motor y bomba, Presión de Descarga de 300 PSI nominal (20 BAR), Caudal de inyección menor o igual 20 Galones/hora.

2.3 Sistema de distribución

El Sistema de distribución comprende las siguientes partes:

- **Árbol de descarga del pozo a la cisterna**, este comprende válvulas de compuerta, válvula unidireccional (check horizontal), unión desmontable (Dresser), macromedidor (para verificar el caudal de explotación del pozo) y tubería bridada clase 125 de diferentes tamaños que permiten llevar el fluido hasta la cisterna.
- **Árbol de descarga de la cisterna a la red de distribución**, este al igual que el anterior cuenta con válvulas de compuerta, válvula unidireccional (check horizontal), unión desmontable (Dresser), macromedidor (para verificar el caudal de explotación del pozo) y tubería bridada clase 125 de diferentes tamaños que se adaptan para realizar la conexión a la red de distribución subterránea.
- **Red de distribución**, es la encargada de conducir el fluido hasta los puntos de consumo, la cual está compuesta por tubería de Hierro Fundido como red principal y los ramales son de tubería PVC, en la cual se instalan válvulas de control y maniobra, válvulas de desaire, y válvulas reguladoras de presión. Los diámetros de la red principal pueden variar considerando el caudal que manejan, mientras que los ramales de distribución varían de $\phi \frac{3}{4}''$ a $\phi \frac{1}{2}''$ en los puntos de consumo.

Las dos variables que controla este sistema son el caudal y la presión manométrica de la red hidráulica, es decir, la altura máxima utilizada en la selección de la bomba; debido a que la demanda por parte de los usuarios es variable con respecto al tiempo, se utiliza en los equipos de rebombeo variadores de velocidad que controlan el parámetro de la frecuencia de la red eléctrica que alimenta a los motores y estos regulan los parámetros de potencia y velocidad en el eje de las bombas.

La función principal de este sistema es la de distribuir el agua desde el tanque cisterna hacia los puntos de consumo a través de la red hidráulica, controlando los parámetros de caudal y presión manométrica, según lo requerido por los usuarios.

3 FUNDAMENTACION TEORICA DE MANTENIMIENTO.

3.1 Mantenimiento centrado en fiabilidad RCM

El mantenimiento Centrado en confiabilidad, conocido comúnmente por sus siglas en inglés “RCM: Reability Centered Maintenance”, se originó hacia el final de la década de los años 60, en un esfuerzo conjunto del gobierno y la industria aeronáutica norteamericana, a fin de establecer un proceso lógico y diseñar actividades de mantenimiento apropiadas con frecuencias óptimas para sus procesos.

El éxito de la industria aeronáutica no tuvo precedentes, en un periodo de 16 años posterior a su implementación, las aerolíneas comerciales no experimentaron incremento en los costos de mantenimiento, aun cuando el tamaño y la complejidad de las aeronaves, así como también los costos de operación se incrementaron durante el mismo periodo. También para el mismo periodo, también se incrementaron los récords de seguridad de las aerolíneas.

La implementación de la metodología del RCM, permite que las organizaciones puedan identificar estrategias efectivas de mantenimiento que garanticen el cumplimiento de los estándares requeridos por los procesos de producción y que ayuden a maximizar la rentabilidad de sus activos. A continuación, se resumen las características generales:

- Es una herramienta que permite ajustar las acciones de control de fallas al entorno operacional
- Es una metodología que se basa en un procedimiento sistemático que permite generar planes óptimos de mantenimiento, es decir que, produce un cambio cultural.
- El tiempo de maduración en la aplicación es de mediano a largo plazo.

La metodología RCM propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional a partir del análisis de las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de ejecución asociados con el activo en su actual entorno de operación?
2. ¿En qué forma falló el equipo, con respecto a la función que cumple en el contexto operacional?
3. ¿Qué causa cada fallo operacional?
4. ¿Qué ocurre cuando sucede un fallo?
5. ¿Cómo impacta cada fallo?
6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada fallo funcional?
7. ¿Qué puede hacerse si no se conoce una tarea de prevención adecuada a este fallo?

3.1.1 Proceso de implementación del RCM

Para el proceso de implantación del RCM, es fundamental conocer qué tipo de activos físicos existen y decidir cuáles son los que deben someterse al proceso de revisión del RCM. Esto significa que debe realizarse un registro completo de los equipos, en el caso que no existiera.

Con el registro obtenido, se realiza una meticulosa planificación de los pasos a seguir tal como lo ilustra la figura 2:

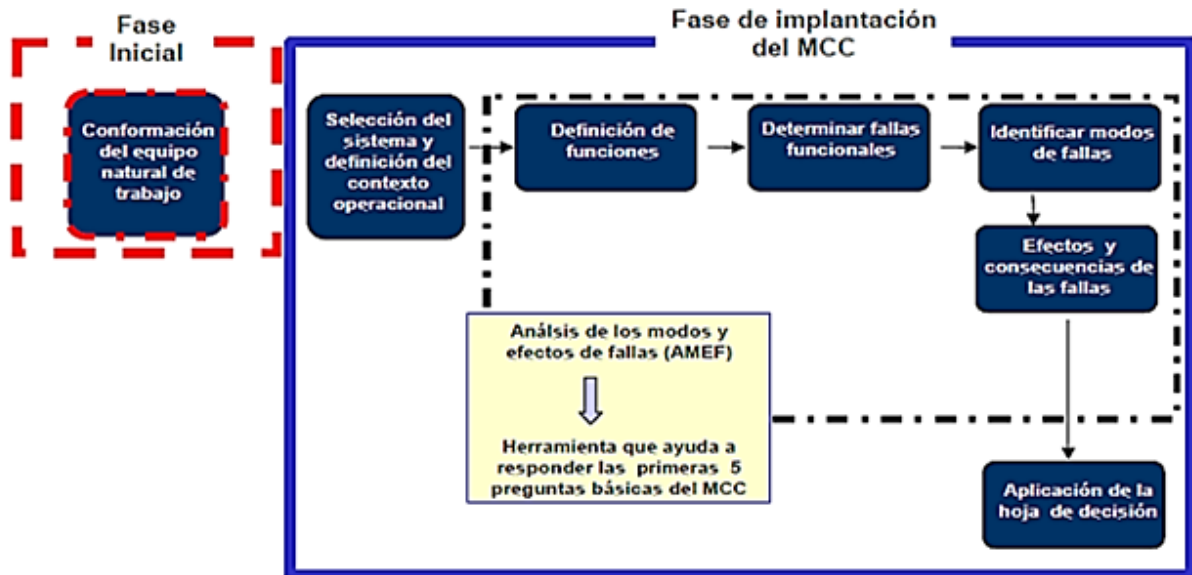


Figura 2. Flujograma de implantación del MCC. (PARRA, 2016)

Se observan en el flujograma dos grandes fases del proceso de implementación:

- I. FASE INICIAL:
 - Formación del equipo natural de trabajo.
- II. FASE DE IMPLEMENTACION:
 - Selección del sistema y definición del contexto operacional.
 - Análisis de los modos y efectos de fallas (AMEF)
 - Aplicación de la lógica RCM (árbol de decisión de estrategias de mantenimiento)

3.1.2 Formación del equipo natural de trabajo del RCM

Para dar respuesta a las 7 preguntas básicas del RCM, es necesario crear un equipo natural de trabajo constituido por personas con distintas funciones dentro de la organización que sean capaces de responder entre todas dichas preguntas, y así asegurar que todos los puntos de vista estarán contemplados a la hora de hacer el estudio. En general, esto no debe significar formar grupos de menos de 4 ni más de 7 personas, lo ideal es un grupo formado por 5 o 6 componentes, como se muestra en la figura 3:

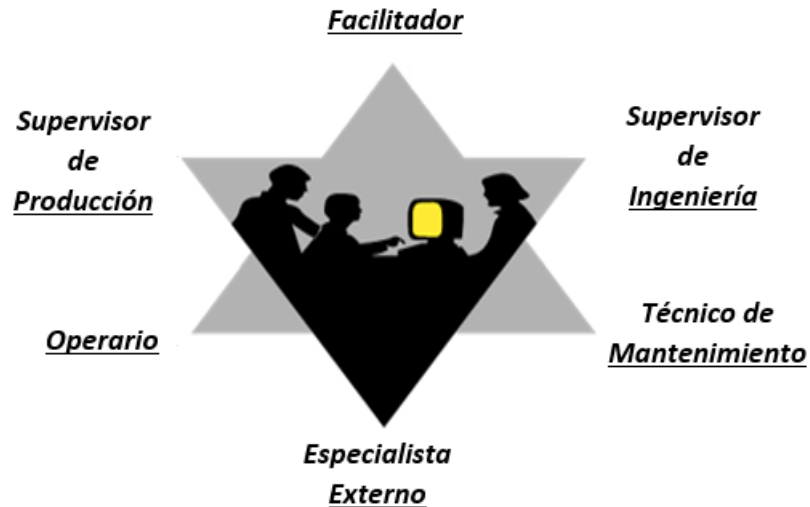


Figura 3. Integrantes de un equipo natural de trabajo de RCM. (PARRA C. &, 2016)

La responsabilidad del facilitador del grupo de trabajo es de suma importancia, su función principal consiste en guiar y conducir el proceso de implantación del RCM, es decir, es el encargado de asegurar que el proceso se realice de forma ordenada y efectiva. El facilitador debe realizar dentro del grupo de trabajo una serie de actividades:

- Guiar al equipo de trabajo en la realización del análisis de los modos y efectos de fallas (AMEF), y en la selección de las actividades de mantenimiento.
- Ayudar a decidir a qué nivel debe ser realizado el análisis de modos y efectos de fallas.
- Ayudar a identificar los activos que deben ser analizados bajo la metodología RCM.
- Asegurar que las reuniones de trabajo sean conducidas de forma profesional con fluidez y normalidad.
- Asegurar un verdadero consenso en las decisiones.
- Motivar al equipo de trabajo.
- Asegurar que toda la documentación a registrar durante el proceso de implantación del RCM sea conducida correctamente.

3.2 Selección del sistema y definición del contexto operacional

Para la selección de los sistemas o equipos a los que se va a aplicar esta metodología, se debe de determinar la parte de las instalaciones a estudiar y la parte o elementos que quedarán excluidos del estudio y, una vez delimitado el sistema a estudiar, determinar su composición, los elementos de nivel inmediatamente inferior que lo constituyen y así sucesivamente, siguiendo con una estructura de árbol hasta el nivel que ya se considere como un todo indivisible desde el punto de vista del mantenimiento. Se debe de considerar que esta estructura puede no ser jerárquica en el sentido estricto, sino tener ramas que se interrelacionan en un mismo nivel o ramas entre niveles no contiguos. Los subsistemas que a su vez tienen bucles de control están en este caso y, por tanto, se deben tratar los bucles como unidades indivisibles, desde el punto de vista del sistema principal, de manera que quede reducido a una estructura jerárquica en árbol pura. Para establecer el sistema o sistemas a los que se va a aplicar el método RCM, definir sus límites y su estructura es necesario responder a las dos preguntas:

1. ¿Cuál debería ser el nivel de detalle que se requiere para realizar el análisis de los modos y efectos de fallas del sistema seleccionado?
2. ¿Debería ser analizada toda el área seleccionada, y si no es necesario, que debería hacerse para seleccionar la parte a analizar y con qué prioridad deben analizarse cada una de las partes?

Para entender mejor lo que significa nivel de detalle es necesario que los grupos de trabajo confirmen o definan los distintos niveles que presenta una determinada organización, es decir, el grado de división existente en la organización: corporación, filiales, departamentos, plantas, sistemas, equipos, componentes son ejemplos de división de una determinada organización. A continuación, se definen algunos términos necesarios para entender el concepto de nivel de detalle:

Parte: representa el nivel más bajo de detalle al cual un equipo puede ser desensamblado sin que sea dañado o destruido. Ejemplos: engranajes, bolas de cojinetes, ejes, resistores, chips... (El tamaño no es el criterio a considerar para establecer qué elemento constituye una parte de un equipo determinado).

Equipo: nivel de detalle constituido por un grupo o colección de partes ubicadas dentro de un paquete identificable, que cumple al menos una función relevante como ítem independiente. Ejemplos: válvulas, motores, bombas, compresores, etc.

Sistema: nivel de detalle constituido por un grupo lógico de equipos que cumplen una serie de funciones requeridas por una organización. La mayoría de los sistemas están agrupados en

función de los procesos más importantes. Ejemplos: sistema de generación de vapor, de tratamiento de aguas, de condensado, de protección, etc.

Planta: nivel de detalle constituido por un grupo lógico de sistemas que funcionan en conjunto para proveer un producto o servicio por procesamiento o manipulación de materiales o recursos.

Complejo o polígono industrial: nivel de detalle constituido por un grupo lógico de plantas que funcionan en conjunto para proveer varios productos o servicios de una misma clase o de distintas clases. Por ejemplo, un grupo de plantas de hidrógeno, azufre, etc., que constituyen un área denominada “Complejo de Refinería, Polígono Petroquímico, etc.”.

La experiencia de expertos en metodología RCM considera más eficaz el análisis de los distintos “sistemas” como nivel de detalle de la organización, esto se debe a que, en la mayoría de las organizaciones, los “sistemas” son normalmente identificados y usados para los bloques funcionales, esquemas, diagramas, etc., y por tanto se tiene de ellos una información más detallada y precisa.

Es necesario que los grupos de trabajo tengan un especial cuidado con respecto a la selección del nivel de detalle que se espera del AMEF, ya que un análisis realizado a un alto nivel de detalle (partes) puede llegar a ser complicado e irrealizable o, por el contrario, un análisis realizado a un bajo nivel de detalle (planta) podría ser muy superficial y poco eficiente para la gestión del mantenimiento en la organización.

Partiendo del nivel de detalle del sistema, para responder la segunda pregunta es necesario que el grupo de trabajo identifique todos los sistemas existentes del área seleccionada y luego proceda a jerarquizar de acuerdo a los criterios de mayor importancia y criticidad del entorno operacional en el que operan dichos sistemas.

3.3 Técnicas de análisis de criticidad aplicadas en el proceso de RCM

Son metodologías que permiten jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos (económicos, humanos y técnicos). Un método de criticidad cualitativo muy utilizado dentro de las aplicaciones de RCM, es el proceso de jerarquización de sistemas basado en matrices de criticidad, que consideran dentro de su proceso de análisis la evaluación del factor “Riesgo”. Este método integra el análisis de la probabilidad (frecuencia) de que se produzca una falla y las consecuencias (nivel de severidad) que pueden traer consigo las fallas de los sistemas a evaluar.

Para realizar un análisis de criticidad es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Definir un alcance y propósito para el análisis de criticidad.

- Establecer criterios (atributos) de importancia.
- Seleccionar o desarrollar un método de evaluación para jerarquizar los sistemas seleccionados.

En relación a los criterios de importancia a ser considerados, estos dependerán básicamente del objetivo principal del proceso de jerarquización y del entorno organizacional y operacional. Entre los atributos más utilizados en los procesos de criticidad se encuentran: Seguridad, Ambiente, Producción, Costos (Operaciones y Mantenimiento), Frecuencia de Fallas y Tiempo promedio para reparar. Es importante mencionar que los resultados que se obtienen con la aplicación de las técnicas de criticidad, representan el insumo básico con el cual se debe dar inicio a cualquier proceso de aplicación de la metodología RCM. A continuación, se presenta un modelo de jerarquización basado en la evaluación semicuantitativa del Riesgo. El modelo propuesto está basado en la estimación del factor Riesgo a través de la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia de Fallas} \times \text{Consecuencias}$$

Dónde:

$$\text{Frecuencia fallas} = \text{Número de fallas en un tiempo determinado}$$

$$\text{Consecuencias} = \left(\begin{array}{l} \text{Impacto} \\ \text{Seguridad} \times 0,25 \\ \text{y Salud} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Impacto} \\ \text{Medio} \times 0,25 \\ \text{Ambiente} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Impacto} \\ \text{Producción} \\ \text{y Costos de Mantto.} \end{array} \times 0,5 \right)$$

El proceso de evaluación de la frecuencia de fallas y de las consecuencias se realiza a través de los siguientes factores ponderados:

- Factores de frecuencia de fallos / escala 1 - 5
 - 1: Sumamente improbable: menos de 1 evento en 5 años
 - 2: Improbable: 1 evento en 5 años
 - 3: Posible: 1 evento en 3 años
 - 4: Probable: entre 1 y 3 eventos al año
 - 5: Frecuente: más de 3 eventos por año
- Factores de consecuencias / escala 1 - 5
 - Impacto Seguridad y Salud
 5. Evento catastrófico: pérdida de vidas humanas.
 4. Evento que genera: lesión incapacitante o efectos a la salud de por vida.
 3. Evento que genera: lesión incapacitante o efectos a la salud de forma temporal.

2. Evento que genera: lesión o efectos a la salud menores (no incapacita al trabajador).
 1. No genera ningún impacto en la seguridad y salud.
- Impacto Medio Ambiente
5. Afectación catastrófica al ambiente (cierre total de las operaciones)
 4. Afectación sensible al ambiente (daños ambientales recuperables a largo plazo, multas, indemnizaciones y cierre temporal)
 3. Afectación moderada al ambiente (daños ambientales recuperables en corto plazo, multas e indemnizaciones)
 2. Incidente ambiental controlable (no genera daños ambientales, costos directos menores)
 1. No genera ningún impacto ambiental
- Impacto en producción y/o en los costos de mantenimiento (PARRA C. &., 2016)
- 5: Pérdidas de producción superiores al 75%, costos de reposición mayores a \$75.000
 - 4: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74%, costos de reposición entre \$50.000 y \$74.999
 - 3: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%, costos de reposición entre \$25.000 y \$49.999
 - 2: Pérdidas de producción entre el 5% y el 24%, costos de reposición entre \$10.000 y \$24.999
 - 1: Pérdidas de producción menor al 5%, costos de reposición menores a \$9.999

Los resultados de la evaluación de los factores anteriores, se presentan en una matriz de criticidad 5 x 5, donde en el eje vertical se presentan cinco niveles de frecuencia de los fallos, mientras que en el eje horizontal se presentan cinco niveles de consecuencia de fallos. La matriz está dividida en cuatro zonas (baja, media, alta y muy alta) que permiten definir la criticidad de los equipos evaluados, tal como lo describe la siguiente figura:

F R E C U E N C I A	<u>5</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>A</u>	<u>MA</u>	<u>MA</u>
	<u>4</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>A</u>	<u>A</u>	<u>MA</u>
	<u>3</u>	<u>B</u>	<u>M</u>	<u>M</u>	<u>A</u>	<u>MA</u>
	<u>2</u>	<u>B</u>	<u>B</u>	<u>M</u>	<u>A</u>	<u>MA</u>
	<u>1</u>	<u>B</u>	<u>B</u>	<u>M</u>	<u>A</u>	<u>MA</u>
		<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
C O N S E C U E N C I A S						

Figura 4. Representación genérica de la matriz de criticidad. (PARRA, 2016)

3.4 Análisis del contexto operacional

Una vez identificados el (los) sistema(s) crítico(s), la metodología de RCM propone que se desarrolle el contexto operacional del (los) sistema(s) a evaluar. Para el desarrollo del contexto operacional hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Resumen Operativo:** Especificar el propósito que cumple el sistema a analizar, describiendo los equipos, procesos y dispositivos de seguridad implicados, así como detallar las metas relativas a la seguridad y medio ambiente y establecer planes futuros.
- **Personal:** Especificar la rotación de turnos de trabajo, las operaciones realizadas y los parámetros de calidad definidos.
- **División de Procesos:** Especificar la división del proceso en sistemas, definir los límites y listar los componentes de los mismos, incluyendo indicadores y dispositivos de seguridad.

La información que necesita recopilarse inicialmente para el desarrollo del contexto operacional es la siguiente:

- Perfil de operación.
- Ambiente de operación.
- Calidad/Disponibilidad de las entradas requeridas (combustible, aire, etc.).
- Alarmas, Monitorización.
- Políticas de repuestos, recursos, logística.

- Diagramas de tuberías e instrumentación del sistema.
- Esquemas del sistema y/o diagramas de bloque.

Una herramienta gráfica que facilita la visualización del contexto operacional, es el diagrama de entrada-proceso-salida (EPS):

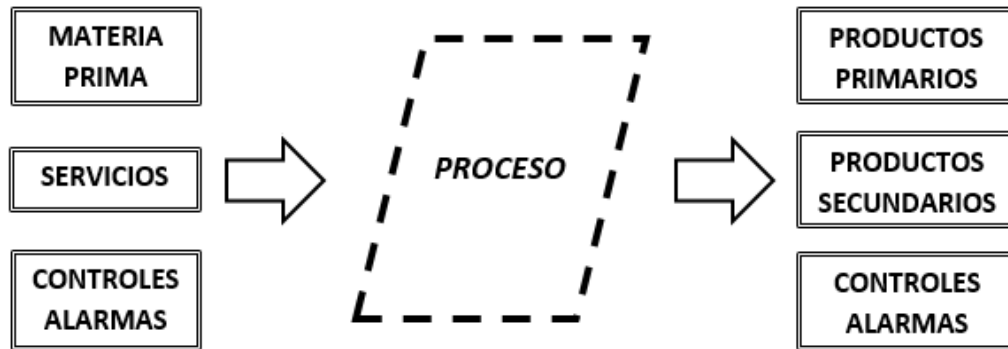


Figura 5. Diagrama Entrada Proceso Salida (EPS). (PARRA C. &, 2016)

Los factores más importantes de este diagrama son:

Las entradas, que pueden ser de tres tipos:

- **Materia prima:** son los recursos tomados directamente por el proceso (sistema/equipo) para transformarlos o convertirlos (gas, crudo, madera...).
- **Servicios:** son los recursos utilizados por el proceso para la transformación de la materia prima (electricidad, agua, vapor...).
- **Controles:** entrada referida a los sistemas de control y sus efectos sobre los equipos o procesos pertenecientes al área en cuestión. Normalmente, no necesitan ser registrados como una función separada ya que su fallo siempre va asociado a una pérdida de señal de salida en alguna parte del proceso.

Las salidas estarán asociadas a las funciones inherentes al sistema y pueden ser:

- **Productos primarios:** Constituyen los principales propósitos del sistema, generalmente son especificados por la tasa de producción y los estándares de calidad.
- **Productos secundarios:** se derivan de funciones principales que cumple el sistema dentro del proceso. La pérdida de los productos secundarios puede causar, en la mayoría de los casos, la pérdida de las funciones primarias y sus consecuencias pueden ser catastróficas.
- **Controles y alarmas:** van asociadas a las funciones de protección y control del sistema.

Los procesos deben registrarse como una descripción de la función a ejecutar por el sistema en un lugar específico, con el fin de concentrar los esfuerzos de mantenimiento sobre la función que

esté siendo analizada y averiguar qué actividades de mantenimiento deben ejecutarse para que el activo cumpla la función dentro del contexto operacional. Una guía recomendada para el desarrollo del contexto operacional es la Norma ISO 14224, esta norma permite definir los límites de contorno del sistema a evaluar y determinar los ítems mantenibles dentro de los subsistemas de los equipos.

3.5 Desarrollo del análisis de Modos y Efectos de Fallos (AMEF)

El Análisis de los Modos y Efectos de Fallos (AMEF) es la herramienta principal del RCM para optimizar la gestión de mantenimiento en una organización determinada ya que ayuda a responder las primeras cinco preguntas básicas del RCM. El AMEF es un método sistemático que permite identificar los problemas antes de que ocurran y puedan afectar a los procesos y productos en un área determinada, bajo un contexto operacional dado. A partir del análisis realizado por los grupos de trabajo RCM a los distintos activos en su contexto operacional, se obtiene la información necesaria para prevenir las consecuencias y los efectos de los posibles fallos a partir de la selección adecuada de las actividades de mantenimiento. Estas actividades se eligen de forma que actúen sobre cada modo de fallo y sus posibles consecuencias, como se aprecia en la siguiente figura:

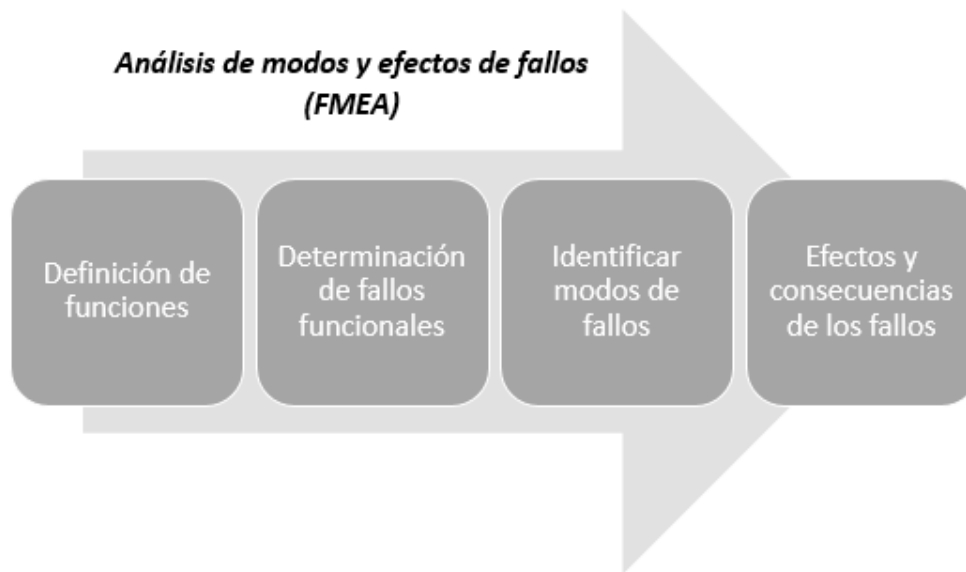


Figura 6. Esquema de Análisis de los Modos y Efectos de Fallos. (PARRA, 2016)

El objetivo básico del AMEF (FMEA por sus siglas en inglés) es encontrar todas las formas o modos en los que puede fallar un activo dentro de un proceso, e identificar las posibles consecuencias de los fallos en función de tres criterios básicos en el RCM: seguridad humana, seguridad del medio ambiente e impacto en la producción.

Para cumplir este objetivo, los grupos de trabajo deben realizar el FMEA siguiendo la siguiente secuencia:

- Definir las funciones de los activos y sus respectivos estándares de operación/ejecución.
- Definir los fallos funcionales asociados a cada función del activo.
- Definir los modos de fallos asociados a cada fallo funcional.
- Establecer los efectos y consecuencias asociados a cada modo de fallo.

3.5.1 AMEF. Definición de funciones y estándares de ejecución

Una función se define como el propósito o la misión de un activo en un contexto operacional específico. La metodología define los siguientes tipos de funciones:

- **Funciones Primarias:** Son las funciones que un activo tiene que cumplir dentro de un proceso, usualmente vienen definidas por el propio nombre del activo. Por ejemplo, la función primaria de una bomba es bombear un determinado fluido.
- **Funciones Secundarias:** Son las funciones que el activo está capacitado para cumplir en adición a las salidas principales descritas por las funciones primarias. Entre las funciones secundarias más características están:
 - **Contención:** La mayoría de los activos cuyas funciones primarias son la transferencia de material, especialmente si es un fluido, tienen que contener a su vez a estos materiales.
 - **Soporte:** Algunos activos tienen una función secundaria estructural de soporte. Por ejemplo, la función primaria de un edificio es proteger a personas, pero además sirve de soporte del techo del mismo.
 - **Apariencia:** La apariencia de algunos activos envuelve funciones específicas. Por ejemplo, la función primaria de la pintura de los equipos industriales es proteger frente a la corrosión, por otro lado, una pintura de color brillante puede ser usada para mejorar la visibilidad del mismo por razones de seguridad.
 - **Higiene y Seguridad:** Los activos deben ser capaces de operar de forma segura y limpia.
- **Funciones de Protección:** Existen equipos que tienen como misión proteger en primera instancia a las personas de los posibles efectos de las fallas y posteriormente proteger a los activos.
- **Funciones de Control:** El patrón de funcionamiento de los equipos de control consiste en tomar mediciones con dispositivos especiales, que se encargan de captar señales de temperatura, presión, flujo, etc., las cuales serán traducidas en valores específicos y

comparadas con rangos normales de operación, permitiendo de esta forma controlar y vigilar el buen funcionamiento de los distintos procesos.

- **Funciones Subsidiarias:** Son funciones realizadas en el proceso principal por equipos especiales adecuados a procesos específicos que no están relacionados directamente con el producto final del proceso principal.

3.5.2 AMEF. Definición de fallos funcionales

Un fallo funcional se define como una ocurrencia no previsible, que no permite que el activo alcance el funcionamiento esperado en el contexto operacional en el cual se desempeña. El nivel de insatisfacción producido por causa del fallo funcional dependerá de las consecuencias que pueda generar la aparición de dicha falla dentro del contexto operacional. Los diferentes fallos funcionales pueden incidir sobre una función de forma parcial o total. La pérdida total de la función ocurre cuando un activo se detiene por completo de forma inesperada. La pérdida parcial ocurre cuando el activo no puede alcanzar el estándar de ejecución esperado, es decir, cuando opera de forma ineficiente o fuera de los límites específicos tolerados.

A continuación, se presenta un ejemplo básico de definición de fallos funcionales:

- **Función:**
 1. Transferir agua del tanque a la piscina a 800 litros por minuto (+/- 100 litros por minuto), a una presión de 45 psig. (+/- 5 psig.) y a una temperatura promedio de 28 grados centígrados (+/- 2 grados centígrados).
- **Fallos funcionales (totales y parciales):**
 - 1.1 No ser capaz de transferir nada de agua (fallo funcional total).
 - 1.2 Transferir agua a menos 700 litros por minuto (fallo funcional parcial).
 - 1.3 Transferir agua a más de 900 litros por minuto (fallo funcional parcial).
 - 1.4 Transferir agua a una presión menor de 40 psig. (fallo funcional parcial).

3.5.3 Definición de modos de fallos

Las funciones de los activos en el contexto operacional y las fallas funcionales dictarán el nivel al cual es requerido el mantenimiento o en otras palabras la definición clara de estos conceptos permitirá establecer los objetivos del mantenimiento con respecto a los activos en su actual

contexto operacional. Los fallos funcionales tienen causas físicas que originan la aparición de las mismas, estas causas son lo que la metodología RCM define como modos de fallos (causas físicas que provocan los fallos funcionales totales o parciales). Las actividades de prevención, anticipación o corrección según el RCM, deben estar orientadas a atacar modos de fallos específicos.

3.5.4 AMEF. Definición de los efectos y consecuencias de los modos de fallos

Consiste en identificar lo que sucederá en el contexto operacional cuando ocurre el modo de fallo previamente identificado. La identificación de los efectos del modo de fallo deberá incluir toda la información necesaria que ayude a soportar la evaluación de las consecuencias de los fallos. Para identificar y describir de forma precisa los efectos producidos por cada modo de fallo, se debe responder de forma clara las siguientes preguntas:

1. ¿Cómo se evidencia (si puede ser evidente) que un modo de fallo ha ocurrido?
La descripción del efecto del fallo deberá especificar si la ocurrencia del modo de fallo se evidencia a partir de algún tipo de señal o de manifestación física (síntomas: como ruido, humo, señales de variables operacionales, alarmas, etc.).
2. ¿Cómo podría afectar la ocurrencia de cada modo de fallo a la seguridad humana o al ambiente?
Se debe detallar si existe la posibilidad de que alguna persona pueda resultar herida o pueda incumplirse alguna norma ambiental. Normalmente, estos modos de fallo aparecen por la mala operación de los equipos, caídas de objetos, presiones excesivas de trabajo, derrames de sustancias químicas, etc., y suelen ser inusuales gracias al avance en el diseño moderno de las instalaciones y sus equipos.
3. ¿Cómo afectaría la ocurrencia de cada modo de fallo a la producción y las operaciones?
Para decidir cuál es la mejor actividad de mantenimiento a ejecutar sobre los activos, es necesario que el grupo de trabajo tenga claramente definido la naturaleza y severidad de las consecuencias de los modos de fallos dentro del proceso de producción (se recomienda cuantificar el impacto económico de cada modo de fallo). En algunos casos los modos de fallo afectarán al producto final, a los procesos, calidad del producto o eficiencia del servicio prestado, en otros, podrán afectar a la seguridad humana o al ambiente. Se debe describir de forma clara si el modo de fallo conlleva impacto en la producción o en las operaciones. En estos casos, normalmente, los modos de fallo generan paros completos de los procesos, reducción de la producción o de la calidad de los productos, aumento de costos de los procesos, etc.

El impacto del modo de fallo en la organización depende del contexto operacional donde trabaje el activo, del estándar de ejecución deseado para la función del activo y de las consecuencias físicas generadas tras la aparición del modo de fallo. La combinación de estos tres factores hace que cada modo de fallo tenga una forma característica de impactar en la seguridad, en el ambiente y en las operaciones. El RCM clasifica los modos de fallo en las siguientes categorías:

- **Modos de fallo con consecuencias ocultas:** las consecuencias se generan a partir de funciones ocultas o no evidentes que presentan algunos activos en su contexto operacional, por ejemplo, los equipos de reserva, de control o de seguridad. La aparición de estos modos de fallo no será evidente dentro del desarrollo normal de las operaciones de un determinado sistema, en el caso de que estos fallos ocurran por si solos. Este tipo de fallos, que no son evidentes por si solos sino cuando otro fallo ocurre, se denominan fallos ocultos.
- **Modos de fallo con consecuencias sobre la seguridad humana y el medio ambiente:** las consecuencias surgen a partir de funciones evidentes de los activos y afectarán, a la seguridad humana y al medio ambiente.
- **Modos de fallo con consecuencias operacionales:** Surgen a partir de funciones evidentes de los activos cuyos fallos funcionales afectarán de forma importante a la producción o las operaciones (cantidad de producto, calidad del mismo, costos de operación, costos directos de reparación, etc.).
- **Modos de fallo con consecuencias no operacionales:** Surgen a partir de funciones evidentes y sus consecuencias son aceptables respecto a la seguridad, ambiente y operaciones, únicamente repercute económicamente, en el costo directo de su reparación.

Las consecuencias de los modos de fallo se determinan apoyándose en el siguiente diagrama:

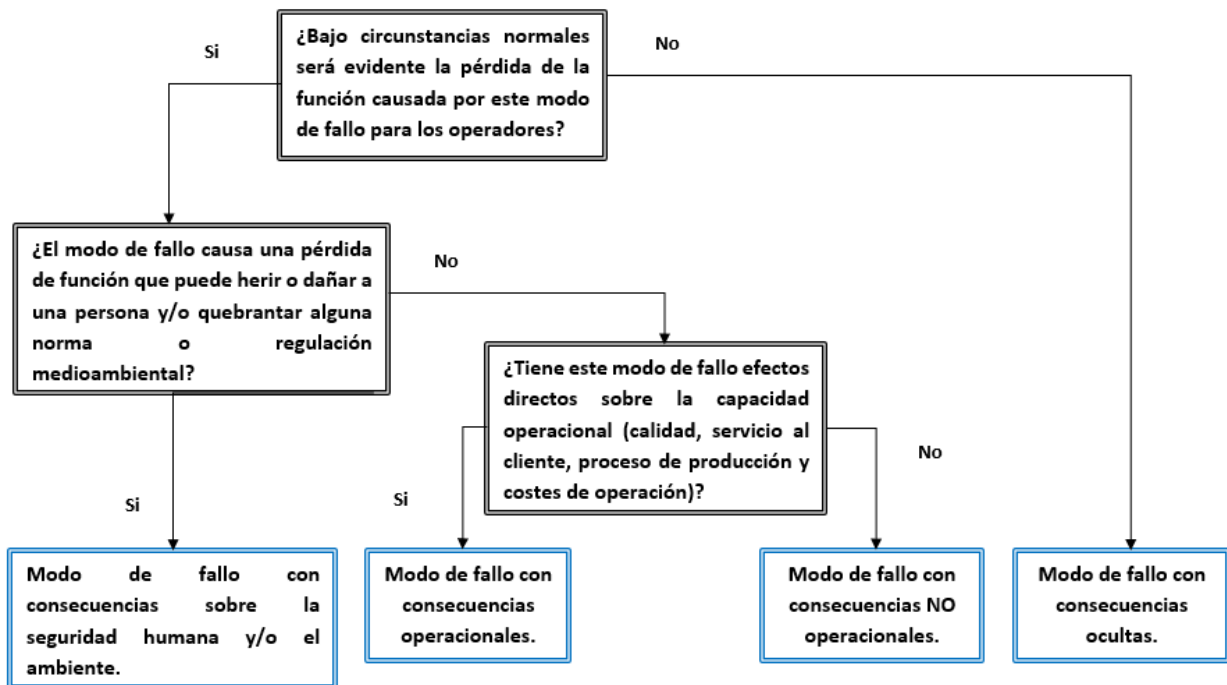


Figura 7. Diagrama para determinar consecuencias de modos de fallos. (PARRA, 2016)

Para la descripción de los efectos, existe una guía de preguntas que permiten simplificar la evaluación de las consecuencias de los modos de fallos:

1. ¿Qué evidencias hay de que ocurrió el fallo?
2. ¿De qué manera afecta la seguridad y al ambiente?
3. ¿De qué manera afecta la producción o las operaciones?
 - 3.1 ¿Cuáles son los efectos operacionales?
 - 3.2 ¿Es necesario parar el proceso?
 - 3.3 ¿Hay impacto en la calidad? ¿Cuánto?
 - 3.4 ¿Hay impacto en el servicio al cliente?
 - 3.5 ¿Se producen daños a otros sistemas?
 - 3.6 ¿Qué tiempo se requiere para reparar el fallo (acciones correctivas)?
 - 3.7 ¿Cuánto es la pérdida económica por el fallo (costos directos, impacto en producción, costos en seguridad y ambiente, etc.)?

3.6 Procesos de selección de las estrategias de mantenimiento (aplicación de árbol lógico de decisión del RCM)

Posterior a la realización del AMEF, se debe seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento que ayude a prevenir la aparición de cada modo de fallo previamente identificado, a partir del árbol lógico de decisión del RCM (herramienta diseñada por el RCM, que permite seleccionar el

tipo de actividad de mantenimiento más adecuada para evitar los posibles efectos de cada modo de fallo). Luego de seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento a partir del árbol lógico de decisión, se tiene que especificar la acción de mantenimiento a ejecutar asociada al tipo de actividad de mantenimiento seleccionada, con su respectiva frecuencia de ejecución, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales es evitar o al menos reducir las posibles consecuencias a la seguridad humana, al ambiente y a las operaciones, que traerán consigo la aparición de los distintos modos de fallos. Se debe identificar el tipo de actividad de mantenimiento, apoyándose en el árbol lógico del RCM. Tras seleccionar el tipo de actividad adecuada, se procede a especificar la acción de mantenimiento concreta a ejecutar y la frecuencia de ejecución de la misma.

El RCM clasifica las actividades de mantenimiento en dos grandes grupos: las de actividades preventivas (proactivas) y las actividades correctivas, estas últimas, se ejecutarán sólo en el caso de no encontrar una actividad efectiva de mantenimiento preventivo. Cada grupo de actividades de mantenimiento tiene sus respectivos tipos de tareas de mantenimiento, las cuales se detallan a continuación:

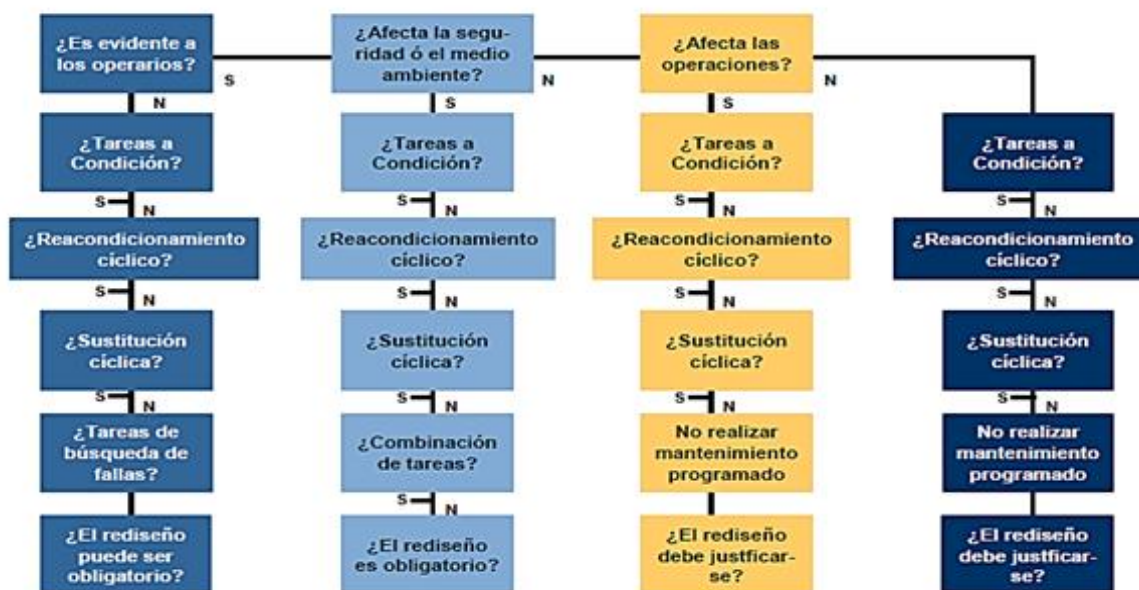


Figura 8. Lógica de la selección de estrategias de mantenimiento. (PARRA, 2016).

3.7 Actividades de mantenimiento preventivas (proactivas)

Para la metodología de RCM, las actividades de mantenimiento preventivas se dividen en 4 categorías:

1. **Tareas programadas en base a condición:** Las actividades programadas en base a condición (predictivas), se basan en el hecho de que la mayoría de los modos de fallos no ocurren instantáneamente, sino que se desarrollan progresivamente en un periodo de tiempo. Si la evidencia de este tipo de modo de fallo puede ser detectada bajo condiciones normales de operación, es posible que se puedan tomar acciones programadas en base a la condición del activo, que ayuden a prevenir estos modos de fallo y eliminar sus consecuencias. El momento en el proceso en el cual es posible detectar que el fallo está ocurriendo o está a punto de ocurrir es conocido como fallo potencial y se define como una condición física identificable que indica que el fallo funcional está a punto de ocurrir o que ya está ocurriendo dentro del proceso.
2. **Tareas de reacondicionamiento:** Son las actividades periódicas que se llevan a cabo para restaurar un activo a su condición original, es decir, actividades de prevención realizadas a los activos a un intervalo de frecuencia menor al límite de vida operativo del activo, en función del análisis de sus funciones en el tiempo. En este tipo de actividades, el activo es puesto fuera de servicio, se realiza una inspección general y se reemplazan, en caso de ser necesario, las piezas defectuosas. Las tareas de restauración programadas son conocidas como overhaul, y su aplicación más común es en equipos mayores: compresores, turbinas, calderas, etc.
3. **Tareas de Sustitución-Reemplazo Programado:** Este tipo de actividad está orientada específicamente hacia el reemplazo de componentes o partes usadas de un activo a un intervalo temporal inferior al de su vida útil (antes que se produzca el fallo). Las actividades de reemplazo devolverán la condición original al componente, ya que se sustituye uno viejo por uno nuevo, la diferencia con las anteriores es simplemente que éstas inciden en los componentes y las de reacondicionamiento involucran a todos los componentes de un equipo mayor, además de que un overhaul no implica una sustitución de piezas viejas, sino que puede limitarse a acciones de limpieza, reparación o inspección.
4. **Tareas de Búsqueda de Fallos Ocultos:** Los modos de fallos ocultos no son evidentes bajo condiciones normales de operación, por lo que este tipo de fallos no tienen consecuencias directas, pero estas consecuencias pueden propiciar la aparición de fallos múltiples dentro de un contexto operacional. Uno de los caminos que puede ayudar a minimizar los efectos de un fallo múltiple es tratar de disminuir la probabilidad de ocurrencia de fallos ocultos, chequeando periódicamente si la función oculta está trabajando correctamente.

3.8 Actividades de mantenimiento correctivas (reactivas)

Cuando las actividades de prevención para un determinado modo de fallo, no son técnicamente factibles, o no son efectivas, el método RCM propone que se evalúen posibles acciones de mantenimiento correctivas (reactivas). Para la metodología de RCM, las actividades de mantenimiento correctivas se dividen en 2 categorías:

1. **Rediseño:** En el caso de no conseguir ningún tipo de actividad preventiva que ayude a reducir la posibilidad de ocurrencia de los modos de fallos que afecten a la seguridad o al ambiente a un nivel aceptable, es necesario desarrollar un rediseño o una modificación (de la estrategia de mantenimiento o del modo de fallo) que permita minimizar o eliminar las consecuencias de esos modos de fallos. Cuando las consecuencias del modo de fallo son de carácter operacional o no operacional; y no se logra conseguir una actividad de mantenimiento preventivo que sea efectiva, la opción de seleccionar una estrategia de rediseño, se convierte en un proceso de justificación económica.
2. **Actividades de Mantenimiento No Programado:** En el caso de no conseguir actividades de prevención económicamente más baratas que los posibles efectos derivados de los modos de fallos con consecuencias operacionales o no operacionales, se podrá tomar la decisión de esperar que ocurra el fallo y actuar de forma reactiva.

4 APLICACIÓN DE RCM, AL PROCESO DE PRODUCCION DE AGUA DE LA ESTACION DE BOMBEO.

Según la metodología descrita en el marco teórico, el primer paso para la implementación del RCM, es la formación de un equipo natural de trabajo conformado por personal de las diferentes dependencias de la empresa, este paso se obviará por tratarse de un estudio, el cual se basa en la recopilación de datos históricos de los fallos funcionales y los modos de fallos de una estación de bombeo para la producción de agua potable establecida en El Salvador, y que ha operado durante aproximadamente dos décadas, a la cual se ha tenido acceso a los últimos 5 años de los datos de mantenimiento.

El análisis para la implementación del RCM en el presente caso de estudio, se realizará en dos etapas principales:

ETAPA I: En esta etapa se seleccionará el sistema al cual se le implementará el RCM, y se estudiará todos los componentes que forman este sistema, detallando sus generalidades, capacidades y las funciones que realizan dentro de su contexto operacional. Posteriormente, a través de una matriz de criticidad basada en riesgo, se establecerá un orden con el nivel jerárquico que permitirá identificar los equipos con mayor riesgo. Esta etapa se considera como el “antes”, de aplicar la metodología y define las condiciones reales de operación, los costos y consecuencias que producen los distintos modos de fallo, así como también su impacto en la gestión administrativa de la empresa.

ETAPA II: En esta etapa se implementará el RCM, aplicando un análisis de causa raíz con el cual se determinarán las posibles causas de los fallos con sus respectivas soluciones. Posteriormente se aplicará el AMEF al sistema o equipos seleccionados en la ETAPA I con el objetivo de obtener una reducción en el impacto económico y de producción en la empresa, al aplicar las actividades de mantenimiento específicas según el entorno operacional, sus fallos funcionales y sus modos de fallo. Muchas de las actividades propuestas, en la realidad se han aplicado, pero no bajo una metodología adecuada, y es precisamente esa la condición que representa un potencial de mejora al aplicar RCM.

4.1 ETAPA I: Contexto operacional actual de la estación de bombeo de agua potable

PROPÓSITO: Extracción de agua de un pozo profundo, potabilizarla y distribuirla a los usuarios pertenecientes a un sector residencial.

DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL PROCESO: El proceso inicia con la explotación del manto acuífero, a través de un pozo maquinado profundo de 500 pies, revestido con un ademe de \varnothing 12”. El

acuífero es explotado con un caudal de 1,500 Galones Por Minuto (GPM), con una bomba de \varnothing 10", tipo turbina vertical de tres etapas, con impulsores de acero inoxidable cerrados y tazones de hierro dúctil los tazones intermedios tendrán las siguientes características: Fabricación Estándar HoFo ASTM A48 - Clase 30 o HoFoDo Clase 60, revestidos con tratamiento porcelanizado, anillos de tazón: Bronce ASTM B584 o ASTM B505, cojinetes de tazones intermedios fabricados de Bronce ASTM B505 o Hule ASTM C-425. Tipo de fijación entre tazones es por medio de pernos de acero, además se utilizará un colador de hierro galvanizado tipo cónico, de acuerdo a Norma AWWA E101 para bomba tipo turbina a instalar en el pozo, para vencer una Carga Dinámica Total (CDT) de 350 pies, esta se encuentra acoplada mecánicamente a través de una serie de ejes a un motor eléctrico vertical trifásico jaula de ardilla de rotor hueco, de 200 HP, 460 V, el cual es controlado y protegido a través de un gabinete de control y fuerza ubicado al interior de una caseta. El panel de control, siendo el gabinete de control y fuerza, tiene las siguientes características: tipo de arranque: con arrancador suave, capacidad 200 HP, número de fases: 3, voltaje de operación (fuerza): 240/480 voltios, voltaje de control: 240 voltios, frecuencia: 60 Hz, gabinete: tipo NEMA 1 con lámina de hierro con esmalte al horno (ANSI-61) sobre pintura anticorrosiva, con puerta y cerradura, con empaques que eviten la entrada de insectos, polvo y otros animales, bornera para neutro y tierra, ventilación forzada logrando una circulación de aire que expulse el aire caliente. Dentro del panel existe un espacio para el circuito de fuerza; otro para el circuito de control.

El agua es succionada por la caja de entrada de la bomba y después pasa hacia las tres etapas donde es impulsada con mayor energía y es extraída del pozo a través de una tubería de columna que está formada por cañería de acero al carbono de \varnothing 10" x 10'. Forman parte integral de esta tubería de columna, la sección de ejes que transmiten la potencia mecánica desde el motor a la bomba, la cual está compuesta por 28 ejes de acero inoxidable de \varnothing 1-5/8" de 10 pies de longitud acoplados a través de manguitos mecánicos. Al interior de la tubería, a cada 10 pies se encuentra un estabilizador de bronce conocido como porta cojinete, ya que en el centro contiene un cojinete de hule neopreno que tiene como función estabilizar al eje de columna que se encuentra girando a una velocidad de 1,750 rpm. El agua es extraída del pozo y se deposita en un tanque cisterna en el cual se encuentran instalados los equipos de rebombeo, uno de operación continua y uno de reserva.

El principio básico de funcionamiento de los equipos de rebombeo, es igual que el equipo de bombeo del pozo, la diferencia consiste en las variables de caudal y presión con los que trabajan ya que estos rebomban el agua disponible en el tanque cisterna según el requerimiento de los usuarios finales y para ello disponen de un sistema de control de velocidad por medio de un variador de frecuencia que regula el parámetro de frecuencia de la red eléctrica que se le suministra a los motores, y estos a su vez regulan las revoluciones por minuto y la potencia en el eje de salida con lo que la bomba trabaja dentro de un rango variable de caudal y presión, que

obedece a las diferentes demandas de los usuarios según horario. El agua es suministrada hacia los puntos de consumo a través de una red hidráulica de distribución ubicada al exterior de la estación de bombeo. Justamente en la salida de los equipos de rebombeo, es inyectado a través de una tubería, una solución de hipoclorito disuelto en agua.

EQUIPOS Y PARTES PRINCIPALES:

- Subestación Eléctrica de servicio
- Gabinete de protecciones y control de motor eléctrico
- Pozo profundo para explotación del acuífero
- Motor eléctrico vertical de eje hueco para bomba en pozo
- Bomba tipo turbina y tubería de columna
- Equipo de cloración para la potabilización del agua
- Equipos de rebombeo en tanque cisterna
- Red hidráulica compuesta por cañerías y válvulas

DIAGRAMA DE ENTRADA-PROCESO-SALIDA

ENTRADAS:

- Agua del manto acuífero
- Energía eléctrica
- Solución de cloro-agua

PROCESO:

- Bombeo de agua desde acuífero subterráneo
- Potabilización de agua
- Rebombeo de agua para distribución

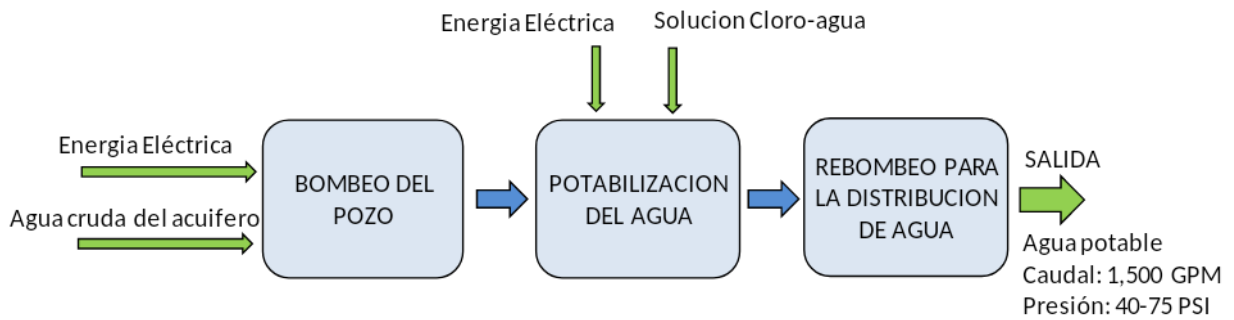


Figura 9. Diagrama de Entrada Proceso Salida. (Autoría propia).

4.1.1 Detalle de equipos y componentes de los sistemas

Se consideran siete los equipos o subsistemas más relevantes para la aplicación del RCM, debido a las funciones que realizan, los cuales se detallan a continuación:

4.1.1.1 Subestación eléctrica de servicio

Capacidad: 300 KVA trifásicos instalados, voltaje primario 23,000 V. Configuración estrella, voltaje secundario 460/230 V. Configuración delta.

Partes o componentes principales: 3 transformadores monofásicos montados en banco, pararrayos (para protección contra descargas atmosféricas), cortacircuitos (para protección contra sobre corrientes instantáneas).

Datos funcionales: Suministro de la energía eléctrica que demanda el sistema de producción de agua potable.



Figura 10. Subestación eléctrica de 300 KVA. (Autoría propia).

4.1.1.2 Gabinete de protecciones y control de motor eléctrico

Capacidad: 200 HP, voltaje de fuerza 460 V., voltaje de control 230 V.

Partes o componentes principales: 1 Contactor de estado sólido para arranque suave, 1 interruptor termomagnético de 400 A/3P, 1 relé de sobrecarga con rango de 150–250 A., 4 relés de control para alarmas y señalización, 1 control de nivel del tipo electromagnético.

Datos funcionales: Protege y controla al motor eléctrico de 200 HP. Controla el encendido y apagado del motor eléctrico en base al nivel de agua del pozo a través de sensores de nivel instalados dentro del pozo.



Figura 11. Gabinete de protección y control para motor de 200 HP. (Autoría propia).

4.1.1.3 Pozo profundo para la explotación del acuífero

Capacidad y datos técnicos: profundidad de 500 pies, revestimiento \varnothing 12", nivel estático 80 pies, nivel dinámico 200 pies.

Partes o componentes principales: ademe de Tubería ciega de \varnothing 8" de Acero al Carbón, bajo Norma ASTM A 53, Grado B. Espesor de tubería de 5/16", y dos secciones de Rejilla tipo puente de \varnothing 8" de Acero al carbón, bajo Norma ASTM A53, Grado B. Espesor de 5/16".

Datos funcionales: Aporta el agua que representa la materia prima principal del sistema de producción.

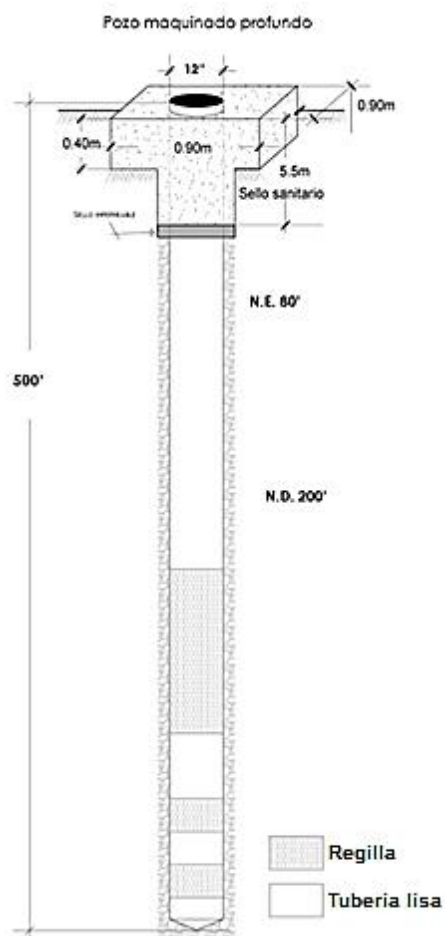


Figura 12. Perfil de pozo profundo. (Autoría propia).

4.1.1.4 Motor eléctrico vertical de eje hueco

Capacidad y datos técnicos: Tipo jaula de ardilla trifásico 200 HP, 460 V., 60 Hz, corriente nominal 230 A., 4 polos, 1,750 rpm.

Partes o componentes principales: devanado estático, rotor jaula de ardilla de eje hueco, mecanismo de giro no reversible.

Datos funcionales: Transforma la potencia eléctrica a mecánica y la transfiere a través de un eje o flecha hacia la bomba.

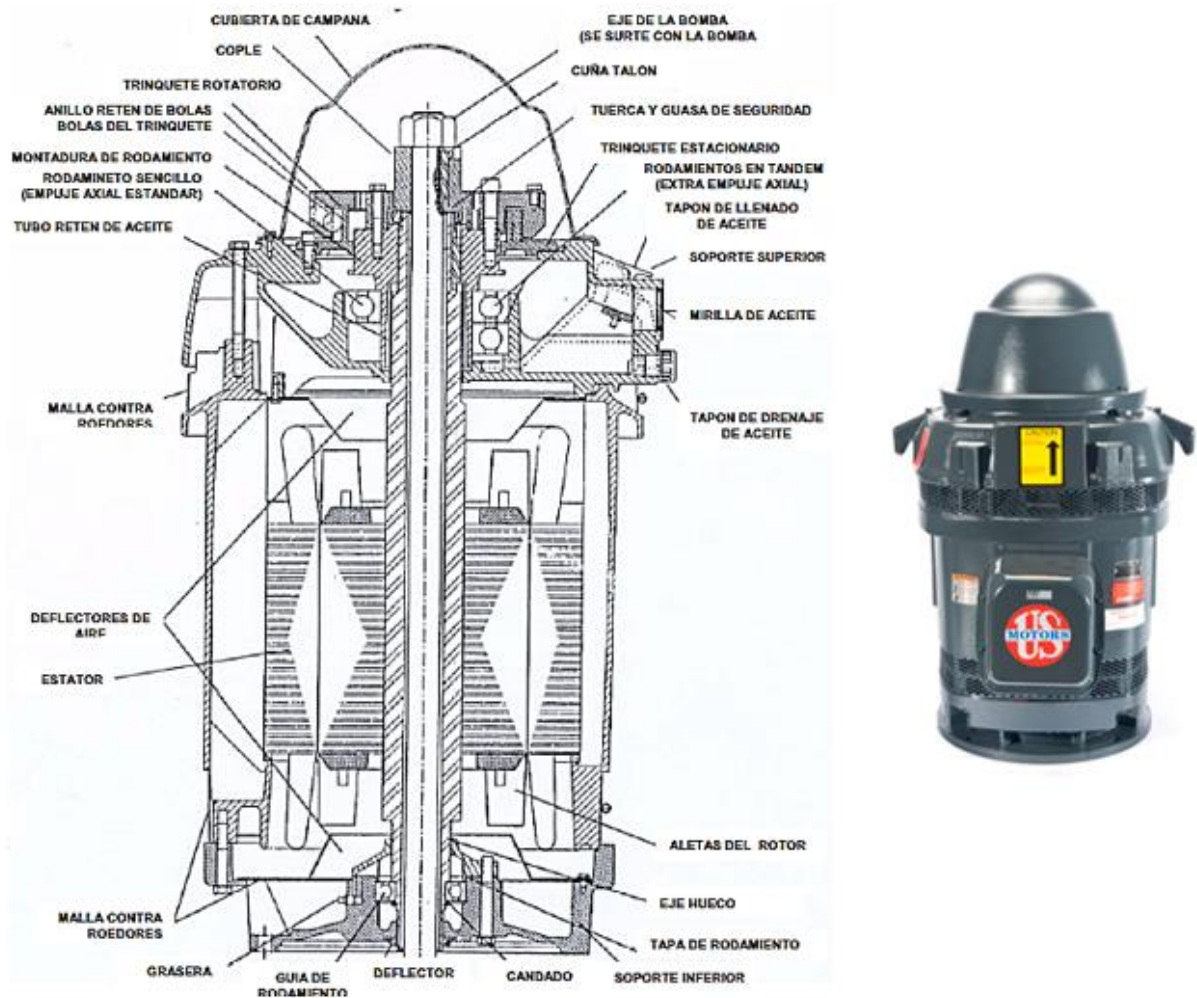


Figura 13. Motor eléctrico vertical de eje hueco de 200 HP. (Motors, 2006).

4.1.1.5 Cabezal de descarga

Capacidad y datos técnicos: Cabezal de descarga tipo S, con succión $\varnothing 10''$ y descarga $\varnothing 10''$ ambas bridadas, construida en Hierro Fundido.

Partes o componentes principales: Carcaza, pieza estopera, prensa estopera, y empaquetadura cuadrada.

Datos funcionales: permite mantener la estabilidad de la columna de succión, direccionar el fluido hacia el árbol de descarga y permite el acople entre la columna y la fuente de potencia (motor eléctrico)

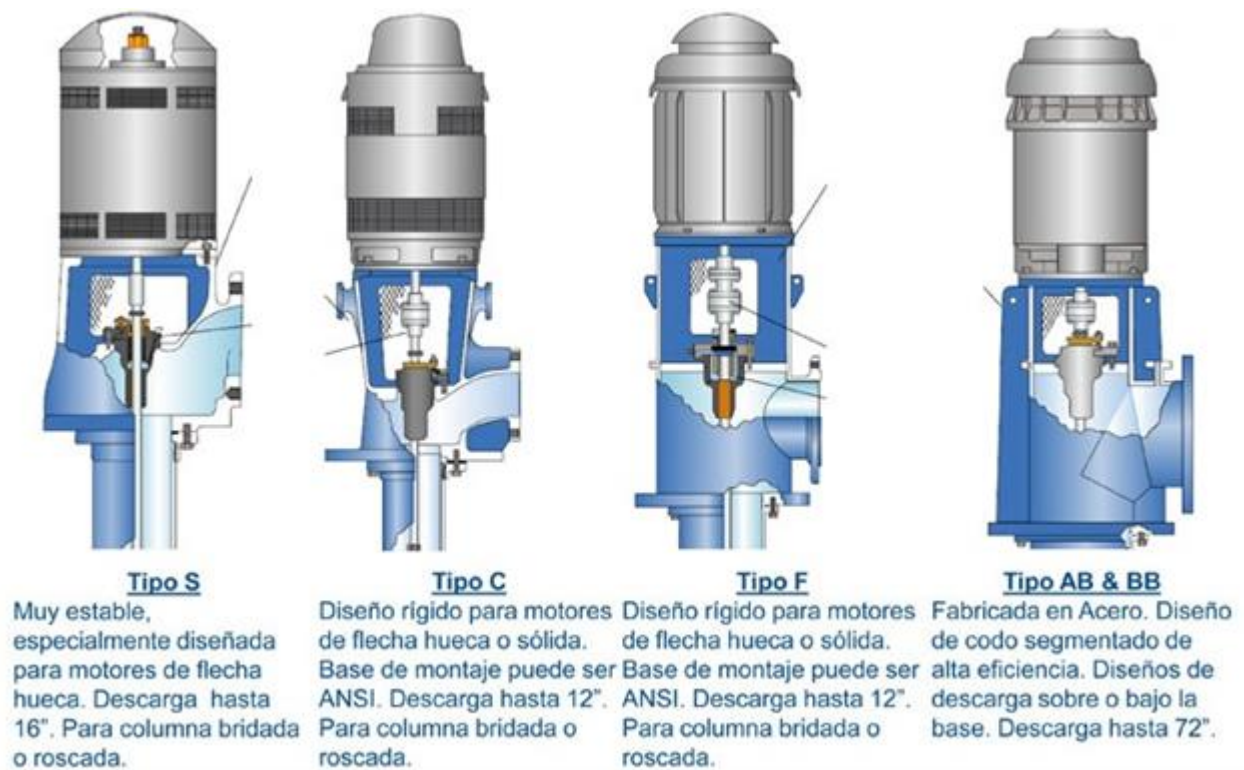


Figura 14. Tipos de Cabezal de descarga. (Pump, 2021)

4.1.1.6 Bomba tipo turbina y tubería de columna

Capacidad y datos técnicos: caudal 1,500 GPM, CDT 350 pies, 3 etapas, eficiencia 78%.

Partes o componentes principales: 1 caja de entrada, 1 caja de salida, 3 tazones de hierro dúctil, tres impulsores de acero inoxidable, 28 tubos de columna de acero al carbón cedula 40 de $\varnothing 10'' \times 10'$, 28 ejes de acero inoxidable de 1-5/8'' con manguito de 1-11/16'', 29 estabilizadores de broce $\varnothing 10''$ con cojinetes de hule neopreno; 1 válvula check horizontal de hierro fundido de $\varnothing 10''$ clase 125; 1 válvula compuerta de hierro fundido de $\varnothing 10''$, vástago elevadizo clase 125; 1 unión tipo Dresser $\varnothing 10''$; 1 cabezal de descarga tipo F, de hierro fundido $\varnothing 10''$.

Datos funcionales: succiona el agua desde el manto acuífero subterráneo y la inyecta en el tanque cisterna de distribución.

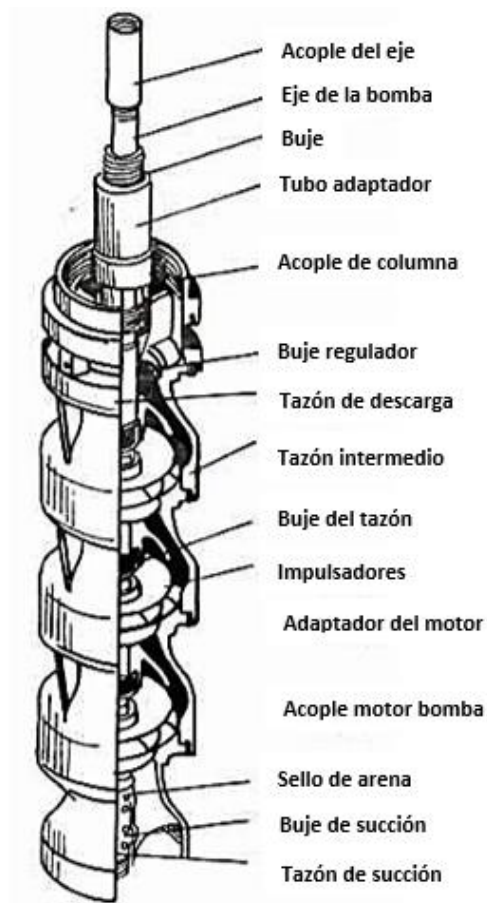


Figura 15. Bomba tipo turbina vertical y tubería de columna. (SENA, 2012).

4.1.1.7 Equipo de cloración para potabilizar el agua

Capacidad y datos técnicos: Hipoclorador, con agitador, tinaco plástico, Presión de Descarga de 300 PSI nominal (20 BAR), Caudal de inyección 20 Galones/hora.

Partes o componentes principales: Consta de un conjunto de motor eléctrico monofásico de 1.0 HP alimentado a 230 V, y una bomba dosificadora con capacidad de control integrado.

Datos funcionales: Dosificar una cantidad de hipoclorito de calcio diluido en agua, en una concentración específica que determina el personal del Departamento de Calidad de Agua, para potabilizar el agua que se suministra a la red de distribución para consumo.



Figura 16. Aparato hipoclorador. (Autoría propia).

4.1.1.8 Equipos de bombeo en tanque cisterna

Capacidad y datos técnicos: Caudal por equipo 1,500 GPM, presión manométrica de operación variable, desde 40 PSI, hasta 75 PSI, potencia de equipos 75 HP, voltaje de operación 460 V.

Partes o componentes principales: 2 motores eléctricos de 75 HP, 460 V.; 2 bombas tipo turbina de eje vertical de 1,500 GPM y CDT máxima de 175 pies; 2 gabinetes de protección y control con variador de frecuencia, con sensores de caudal y presión; 2 válvulas check horizontales de hierro fundido de $\varnothing 10''$ clase 125; 2 válvulas compuerta de hierro fundido de $\varnothing 10''$, vástago elevadizo clase 125; 2 unión tipo Dresser $\varnothing 10''$; 2 cabezal de descarga tipo F, de hierro fundido $\varnothing 10''$.

Datos funcionales: la función principal es rebompear el agua disponible en el tanque cisterna, para entregarla a la red hidráulica, según las variables de caudal y presión requeridos por los usuarios.



Figura 17. Equipos de bombeo en tanque cisterna. (Autoría propia).

4.1.2 Implementación de metodología de matriz de criticidad basada en el modelo de priorización por riesgo.

El objetivo de la aplicación de la metodología de análisis de criticidad basada en una matriz de riesgo, es la obtención del nivel jerárquico para la selección de los sistemas que más impactan en la rentabilidad y operatividad del proceso y delimitar la implementación del RCM en dicho sistema seleccionado.

Para el presente caso de estudio, debido a que los tres sistemas que realizan el proceso son indispensables y dependen uno del otro, se analizará todo como un solo sistema, y la obtención del nivel jerárquico será únicamente para establecer el grado de impacto negativo que se tiene en cada equipo y poder definir las actividades de mantenimiento que apliquen según su entorno operacional.

El análisis se realiza con los datos obtenidos de las bitácoras de mantenimiento (anexo 1)

Los criterios a utilizar para la matriz de criticidad son los siguientes:

- Factores de frecuencia de fallos / escala 1 - 5
 - 1: Excelente: menos de 1 evento al año
 - 2: Bueno: 2 eventos al año
 - 3: Promedio: 3 eventos al año
 - 4: Pobre: 4 eventos al año
 - 5: Muy pobre: más de 4 eventos por año

- Factores de consecuencias / escala 1 - 5
 - Impacto Seguridad – Higiene – Ambiente (SHA)
 5. Evento catastrófico: muerte y/o alto impacto ambiental
 4. Evento que genera: lesión incapacitante y/o afectación sensible al ambiente
 3. Evento que genera: daños menores a la integridad física y/o afectación al ambiente controlable.
 2. Evento que genera: alarma potencial en seguridad y/o incidente ambiental sin repercusión sobre la normativa legal vigente
 1. No genera ningún impacto en la seguridad y el ambiente.

- Impacto social (IS)
 5. Afectación a los usuarios por agua no servida (más de 24 horas)
 4. Afectación a los usuarios por agua no servida (15 a 24 horas)
 3. Afectación a los usuarios por agua no servida (10 a 15 horas)
 2. Afectación a los usuarios por agua no servida (5 a 10 horas)
 1. Afectación a los usuarios por agua no servida (1 a 5 horas)

- Impacto en producción y/o en los costos de mantenimiento (IP-CM); estos criterios están basados en el costo de sustitución de los sistemas evaluados en la planta de bombeo.
 - 5: Costos de pérdidas de producción y reparación superiores a \$50,000
 - 4: Costos de pérdidas de producción y reparación superiores a \$30,000
 - 3: Costos de pérdidas de producción y reparación superiores a \$15,000
 - 2: Costos de pérdidas de producción y reparación superiores a \$5,000
 - 1: Costos de pérdidas de producción y reparación inferiores a \$1,000

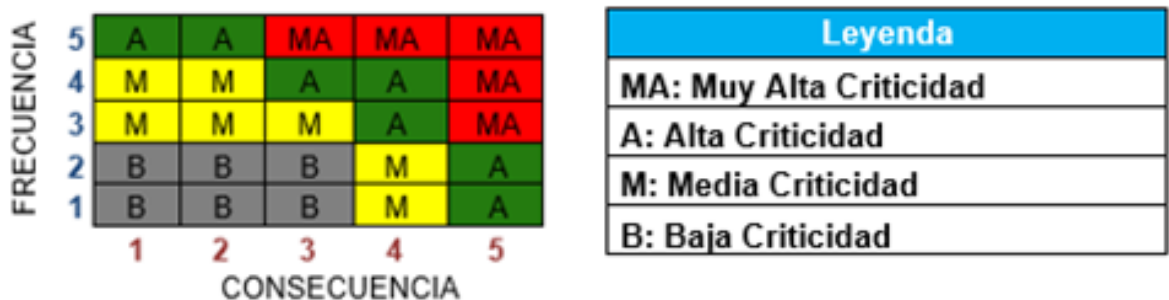


Figura 18. Matriz de criticidad Frecuencia vs Consecuencia. (PARRA, 2016).

Aplicando la matriz de criticidad obtenemos la jerarquía de los equipos:

Tabla 1. Matriz de criticidad para la jerarquización de equipos.

CODIGO DEL EQUIPO	DENOMINACIÓN	FRECUENCIA FALLAS	SHA	IS	IP - CM	CONSECUENCIAS	TOTAL	JERARQUIZACIÓN	CENTROS UTILIZADOS PARA LA SELECCIÓN DE VALORES
1	Subestación Eléctrica	2	1	1	1	1	2	Baja Criticidad	El costo de la reparación es bajo y el impacto en el agua no producida también debido al corto tiempo de reparación
2	Gabinete de protecciones y control de motor eléctrico del pozo	5	1	2	2	2	10	Alta Criticidad	El costo de reparación es considerable y el impacto en el agua no producida también es debido al tiempo de reparación. La frecuencia es alta.
3	Pozo Profundo	1	1	5	3	5	5	Alta Criticidad	El impacto social es alto y el costo de producción y reparación también, por el tiempo de reparación.
4	Motor Eléctrico para equipo de bombeo en pozo	2	1	2	2	2	4	Baja Criticidad	El costo de la reparación es considerable y el impacto por el agua no producida también. La frecuencia es baja.
5	Bomba turbina y tubería de columna en pozo	2	1	5	3	5	10	Alta Criticidad	El impacto social es alto y el costo de producción y reparación también, por el tiempo de reparación.
6	Equipo de Cloración	1	1	2	1	2	2	Baja Criticidad	El costo de la reparación es bajo y el impacto en el agua no producida también es debido al corto tiempo de la reparación.
7	Equipos de rebombeo en cisterna	1	1	1	1	1	1	Baja Criticidad	El costo de la reparación es medio y el impacto en el agua no producida es bajo debido al corto tiempo de reparación, La frecuencia es media.

4.1.3 Análisis de Modos y Efectos de Fallos con datos registrados en un año en la estación de bombeo.

DETALLE DE FUNCIONES Y MODOS DE FALLOS.

Tabla 2.a. Tabla de funciones y modos de fallos.

#	FUNCIÓN	#	FALLO FUNCIONAL	#	MODO DE FALLO
1	Suministrar energía eléctrica para la operación del sistema	1.a	No hay energía eléctrica.	1.a.1	Pararrayo de subestación dañado.
				1.a.2	Fusible primario de subestación disparado.
2	Controlar el arranque y paro del motor eléctrico del pozo	2.a	El motor del equipo no arranca.	2.a.1	Contactador de bypass de gabinete de control de pozo dañado.
				2.a.2	Banco de capacitores de gabinete de control de pozo dañado.
		2.b	El motor se suspende súbitamente.	2.b.1	Relé de control de nivel de gabinete de pozo dañado.
3	Transferir potencia mecánica al eje de la bomba	3.a	El motor hace fuerte ruido y vibra.	3.a.1	Rodamientos de motor de equipo de pozo dañados
		3.b	El motor no trabaja.	3.b.1	Devanado de motor eléctrico de pozo cortocircuitado.
4	Extraer el agua desde el manto acuífero a través del pozo	4.a	El equipo de bombeo vibra mucho.	4.a.1	Pieza prensa estopas de cabezal de descarga dañado.
				4.a.2	Portacojinete dañado.
		4.b	El equipo no bombea agua.	4.b.1	Bomba dañada.
5	Acceder al manto acuífero subterráneo para la explotación del agua.	5.a	Bajo nivel de agua según lo requerido.	5.a.1	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua Bajo nivel de agua, rejillas de pozo obstruidas
6	Potabilizar el agua.	6.a	El equipo no inyecta cloro.	6.a.1	Diafragma de bomba dosificadora de Hipoclorador dañado.
7	Rebompear agua con un caudal máximo de 1500 GPM y una presión variable de 40 a 75 psi.	7.a	Equipo de rebombeo 1 no arranca.	7.a.1	Protector de voltaje de panel de control dañado.
		7.b	Equipo de rebombeo 2 se dispara súbitamente	7.b.1	Relé de sobrecarga dañado.
		7.c	Motor de rebombeo 1 con fuerte ruido y vibra en exceso	7.c.1	Rodamientos de motor eléctrico dañados
		7.d	Equipo de rebombeo 1 vibra y tiene fuerte fuga en pieza estopera.	7.d.1	Eje estopero desgastado.
		7.e	Equipo de rebombeo 1 no bombea agua.	7.e.1	Impulsores de bombas dañados.
		7.f	Equipo de rebombeo 2 vibra y tiene fuerte fuga en pieza estopera.	7.f.1	Eje estopero desgastado.
		7.g	Equipos de rebombeo 1 y 2 no levantan presión.	7.g.1	Válvulas de retención y compuerta dañadas.
		7.h	Equipo de rebombeo 2 no bombea agua	7.h.1	Impulsores de bombas dañados.

DETALLE DE CONSECUENCIAS DE LOS FALLOS

Tabla 2.b. Tabla de consecuencias por fallos.

#	MODO DE FALLO	FRECUENCIA DE EVENTOS POR FALLO	TPPR (horas)	COSTO PRODUC. (\$)	COSTO REP. (\$)	RIESGO (modo de fallo) \$/año	RIESGO (Fallo funcional) \$/año
1.a.1	Pararrayo de subestación dañado	1	3	357	450	807	807
1.a.2	Fusible primario de subestación disparado	1	1	119	50	169	169
2.a.1	Contactador de bypass de gabinete de control de pozo dañado	2	10	1190	650	3680	9186
2.a.2	Banco de capacitores de gabinete de control de pozo dañado	2	8	952	875	3654	
2.b.1	Relé de control de nivel de gabinete de pozo dañado	2	4	476	450	1852	
3.a.1	Rodamientos de motor de eq. de pozo dañados	2	10	1190	1500	5380	5380
3.b.1	Devanado de motor eléctrico de pozo cortocircuitado	1	96	11424	6000	17424	17424
4.a.1	Pieza prensa estopas de cabezal de descarga dañada	1	10	1190	950	2140	2140
4.a.2	Portacojinete dañado	2	36	4284	2690	13948	33972
4.b.1	Bomba dañada	1	96	11424	8600	20024	
5.a.1	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua	3	6	714	450	3492	22772
	Bajo nivel de agua, rejillas de pozo obstruidas	1	120	14280	5000	19280	
6.a.1	Diafragma de bomba dosificadora de hipoclorador dañado	2	4	476	650	2252	2252
7.a.1	Protector de voltaje de panel de control dañado	2	0	0	875	1750	2650
7.b.1	Relé de sobrecarga dañado	2	0	0	450	900	
7.c.1	Rodamientos de motor eléctrico dañados	2	0	0	670	1340	1340
7.d.1	Eje estopero desgastado	3	0	0	550	1650	1650
7.e.1	Impulsores de bomba dañados	1	0	0	4200	4200	4200
7.f.1	Eje estopero desgastado	1	0	0	550	550	3002
7.g.1	Válvulas de retención y compuerta dañadas	1	8	952	1500	2452	
7.h.1	Impulsores de bomba dañados	1	0	0	3370	3370	3370
COSTO TOTAL						\$ 110,314.00	\$ 110,314.00

Los datos de los modos de fallos forman parte de los registros de las bitácoras de mantenimiento (anexo 1), en los cuales se refleja el histórico de los eventos, incluyendo los menores que si se analizan individualmente, no se lograría apreciar el impacto que generan, además no se encontraron datos relevantes de los costos en los que se incurrió para solventarlos ya que en la mayoría de estos casos el sistema no paro su producción. Esto no significa que no sean importantes, únicamente que en esta etapa del análisis no se han considerado ya que se trata de la evaluación del sistema con su entorno operativo actual, y en este entorno, las políticas de mantenimiento han sido deficientes. Se evaluarán entonces aquellos modos de fallo más significativos que han causado un gran impacto.

Para el caso del dimensionamiento del costo del agua no producida, se utilizó un costo promedio tomando de base el pliego tarifario vigente de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) de El Salvador, para un consumo de 24 metros cúbicos mensuales por usuario, según el siguiente procedimiento:

Costo del metro cubico de agua: \$0.35

Caudal máximo de producción de la estación de bombeo: $1,500 \text{ GPM} = 340 \text{ m}^3\text{h}$

Costo de metro cúbico por hora: $\$119.00 \text{ m}^3\text{h}$

En cuanto al costo de las reparaciones, este dato también se obtuvo de los registros de mantenimiento e incluyen materiales, repuestos y mano de obra. La mano de obra se ha implementado bajo la modalidad de subcontratación de servicios, por lo que los montos podrían variar al implementar un programa de mantenimiento bajo la administración directa del personal involucrado en estas actividades.

De las tablas 2.a y 2.b, se puede apreciar cuales son los modos de fallo que más impactan económicamente en la producción, los cuales representan los potenciales más grandes para lograr el objetivo de reducir el impacto negativo, aplicando las actividades de mantenimiento adecuadas según el entorno operacional del sistema y para ello es necesario realizar un análisis de las probables causas que ocasionan estos fallos para establecer las actividades de mantenimiento que eliminarían o reducirían el riesgo que sucedan.

4.2 ETAPA II: Implementación de Análisis de Causa Raíz AMEF, dentro del marco del RCM

En las condiciones actuales en la estación de bombeo se desarrolla una política de mantenimiento en la cual se corrigen los fallos hasta que han ocasionado paros funcionales totales o parciales, lo que genera un gran impacto negativo a la economía y a la operación del proceso.

El mantenimiento correctivo por sí, no es una mala política de mantenimiento, más bien la selección de este en el entorno equivocado es lo que genera una percepción de algo malo o incorrecto. De igual manera, el mantenimiento preventivo no necesariamente significa que por sí solo sea la mejor opción, ya que la efectividad de este, al igual que el correctivo, depende de la selección de las actividades de acuerdo al entorno operacional del equipo o sistema.

Para el caso en estudio, se cuenta con datos históricos en los cuales se determina que en términos generales no ha existido una verdadera gestión de mantenimiento que permita la selección más conveniente de las actividades de mantenimiento a realizar, para eliminar o reducir al mínimo el riesgo de la ocurrencia de fallos, lo cual ha impactado en gran manera en términos económicos y de disponibilidad del servicio de agua potable demandado por los usuarios, lo que provoca a su vez el deterioro de la imagen de la empresa que administra la estación de bombeo.

Las consecuencias de aplicar la política de mantenimiento correctivo como un método genérico, se refleja en el evidente deterioro prematuro de las partes de los equipos críticos por lo que su reparación se vuelve más costosa en términos económicos, ya que se vuelve necesario en la mayoría de eventos, el cambiar las partes principales de los equipos y los tiempos que se requieren para su realización son grandes, lo que también impacta la producción por el agua no servida a los usuarios.

En la tabla 2.b, se puede apreciar el impacto en los costos del agua no producida y la reparación de los fallos como resultado de la actual política de mantenimiento, y este dato es el que representa el mayor reto, ya que con la implementación del RCM, el objetivo es minimizar este costo total.

Para lograr establecer las actividades adecuadas para cada modo de fallo, es necesario realizar un análisis de causa raíz, el cual se presenta en la siguiente tabla:

ANÁLISIS CAUSA RAIZ.

Tabla 2.c. Tabla de Análisis Causa Raíz.

MODO DE FALLO		HIPOTESIS A (alta probabilidad) B (media probabilidad) C (baja probabilidad)	CAUSAS físicas (F) humanas (H) Latentes (L)	RECOMENDACIONES
1.a.1	Pararrayo de subestación dañado	Descarga atmosférica transitoria (A)	Zona con baja recurrencia de descargas atmosféricas (L)	Actividad correctiva, mantener repuesto en inventario
1.a.2	Fusible primario de subestación disparado	contacto de animal en aislamiento primario (A)	Falta de aislamiento adecuado (F)	Instalar aisladores contra fauna
2.a.1	Contactador de bypass de gabinete de control de pozo dañado	Daño en contactos principales y bobina de control (B)	Exceso de suciedad produce calentamiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo programado a panel de control
2.a.2	Banco de capacitores de gabinete de control de pozo dañado	Puntos calientes en bornes de conexión (B)	Falsos contactos producen puntos calientes y caídas de tensión en banco de capacitores (F)	Realizar mantenimiento preventivo programado a panel de control
2.b.1	Relé de control de nivel de gabinete de pozo dañado	Cables de control de electrodos en malas condiciones (A)	Canalización no adecuada de cables de señal de electrodos causa cortocircuito en la señal (F)	Realizar mantenimiento preventivo programado a panel de control y canalizaciones eléctricas de alambreado de control y fuerza
3.a.1	Rodamientos de motor de eq. De pozo dañados	Finalización de su vida útil (A)	Tipo de servicio continuo (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
3.b.1	Devanado de motor eléctrico de pozo cortocircuitado	Variaciones de voltaje y/o corriente dañaron el devanado	Relés de sobrecarga y protector de voltaje en malas condiciones	Realizar mantenimiento preventivo programado a motor eléctrico
4.a.1	Pieza prensa estopos de cabezal de descarga dañada	Desgaste por exceso de uso (A)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
4.a.2	Portacojinete dañado	Desgaste de cojinete de hule neoprene por exceso de uso (B)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
4.b.1	Bomba dañada	Desgaste en bujes de tazón provocan descentralización y daños en impulsores (A)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
5.a.1	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua Bajo nivel de agua, rejillas de pozo obstruidas	Cantidad de agua que ingresa del acuífero hacia el pozo ha disminuido (A)	Rejillas de tubería de revestimiento obstruidas. Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo programado, coordinado con mantenimiento de bomba
6.a.1	Diafragma de bomba dosificadora de hipoclorador dañado	Desgaste por exceso de uso (A)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
7.a.1	Protector de voltaje de panel de control de rebombeo #1 dañado	Variación de voltaje transitoria dañó el relé (A)	Exceso de suciedad produce calentamiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo programado a panel de control
7.b.1	Relé de sobrecarga dañado	Corriente de falla transitoria dañó el relé (A)	Exceso de suciedad produce calentamiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo programado a panel de control
7.c.1	Rodamientos de motor eléctrico dañados	Finalización de su vida útil (A)	Tipo de servicio continuo (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
7.d.1	Eje estopero desgastado	Desgaste por exceso de uso (A)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
7.e.2	Impulsores de bomba dañados	Desgaste en bujes de tazón provocan descentralización y daños en impulsores (A)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
7.f.1	Eje estopero desgastado	Desgaste por exceso de uso (A)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
7.g.1	Válvulas de retención y compuerta dañadas	Desgaste de vástagos por exceso de uso (A)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición
7.h.1	Impulsores de bomba dañados	Desgaste en bujes de tazón provocan descentralización y daños en impulsores (A)	Periodos de operación muy largos sin mantenimiento (F)	Realizar mantenimiento preventivo por condición

En el siguiente paso, se presenta el plan de mantenimiento más adecuado al entorno operacional de cada uno de los equipos, el cual está orientado a reducir las frecuencias de los eventos de fallos, o a eliminarlos completamente. La siguiente tabla detalla el plan de mantenimiento a implementar y sus costos:

Tabla3. . Plan de mantenimiento propuesto.

MODO DE FALLO CON POTENCIAL DE AHORRO		ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO UTILIZANDO EL ARBOL LOGICO DE DECISION	ACCION DE MANTENIMIENTO A EJECUTAR	FRECUENCIA DE APLICACIÓN	RESPONSABLE	COSTOS POR ACTIVIDAD PROPUESTA (\$)	COSTOS ANUALES DE LAS ACTIVIDADES PROPUESTAS (\$)
2.a.1	Contactador de bypass de gabinete de control de pozo dañado	Tarea preventiva programada en base a tiempo	Mantenimiento preventivo a gabinete de control de equipo de bombeo en pozo (anexo 2)	4 meses	Técnico electricista	\$ 350.00	\$ 1,050.00
2.a.2	Banco de capacitores de gabinete de control de pozo dañado						
2.b.1	Relé de control de nivel de gabinete de pozo dañado						
3.a.1	Rodamientos de motor de eq. De pozo dañados	Tarea preventiva programada en base a condición	Acción predictiva implementando tecnología de análisis de vibración, medición de parámetros eléctricos y temperatura a motores eléctricos de equipo de bombeo y rebombeo (anexo 5)	6 meses	Técnico electromecánico	\$ 225.00	\$ 450.00
3.b.1	Devanado de motor eléctrico de pozo cortocircuitado	Tarea preventiva de sustitución-reemplazo programado	Acción preventiva para reemplazar componentes desgastados en motor eléctrico de equipo de bombeo de pozo (anexo 6)	12 meses	Técnico electromecánico	\$ 975.00	\$ 975.00
4.a.1	Pieza prensa estopas de cabezal de descarga dañada	Tarea preventiva programada en base a condición	Acción predictiva implementando tecnología de análisis de vibración a tubería de columna y bomba de pozo (anexo 8)	4 meses	Técnico electromecánico	\$ 75.00	\$ 1,125.00
4.a.2	Portacojinete dañado	Tarea preventiva de sustitución-reemplazo programado	Acción preventiva para reemplazar componentes desgastados en tubería de columna y bomba de pozo (anexo 9)	Según diagnóstico de mantenimiento predictivo (mínimo 1 vez al año)	Técnico electromecánico	\$ 4,675.00	\$ 4,675.00
4.b.1	Bomba dañada						
5.a.1	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua	Tarea preventiva de reacondicionamiento, programada en base a tiempo	Mantenimiento preventivo a pozo maquinado profundo (anexo 4)	12 meses	Brigada de mantenimiento de pozos	\$ 4,250.00	\$ 4,250.00
	Bajo nivel de agua, rejillas de pozo obstruidas						
6.a.1	Diafragma de bomba dosificadora de hipoclorador dañado	Tarea preventiva programada en base a tiempo	Mantenimiento preventivo a equipo de cloración (anexo 3)	4 meses	Técnico electromecánico	\$ 525.00	\$ 1,575.00

Tabla 3. Plan de mantenimiento propuesto (continuación).

MODO DE FALLO CON POTENCIAL DE AHORRO		ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO UTILIZANDO EL ARBOL LOGICO DE DECISION	ACCION DE MANTENIMIENTO A EJECUTAR	FRECUENCIA DE APLICACIÓN	RESPONSABLE	COSTOS POR ACTIVIDAD PROPUESTA (\$)	COSTOS ANUALES DE LAS ACTIVIDADES PROPUESTAS (\$)
7.a.1	Protector de voltaje de panel de control de bombeo #1 dañado	Tarea preventiva programada en base a tiempo	Mantenimiento preventivo a gabinete de control de equipo de bombeo en pozo (anexo 2)	4 meses	Técnico electricista	\$ 350.00	\$ 1,050.00
7.b.1	Relé de sobrecarga dañado						
7.c.1	Rodamientos de motor eléctrico dañados	Tarea preventiva programada en base a condición	Acción predictiva implementando tecnología de análisis de vibración, medición de parámetros eléctricos y temperatura a motores eléctricos de equipo de bombeo y rebombeo(anexo 5)	6 meses	Técnico electromecánico	\$ 225.00	\$ 450.00
7.d.1	Eje estopero desgastado	Tarea preventiva programada en base a condición	Acción predictiva implementando tecnología de análisis de vibración a bomba de equipo de bombeo (anexo 8)	3 meses	Técnico electromecánico	\$ 375.00	\$ 1,500.00
7.e.1	Impulsores de bomba dañados						
7.f.1	Eje estopero desgastado	Tarea preventiva programada en base a condición	Acción predictiva implementando tecnología de análisis de vibración a bomba de equipo de bombeo (anexo 8)	6 meses	Técnico electromecánico	\$ 375.00	\$ 750.00
7.g.1	Valvulas de retencion y compuerta dañadas						
7.h.1	Impulsores de bomba dañados	Tarea preventiva programada en base a condición	Acción preventiva para reemplazar componentes desgastados en bomba de quipo de bombeo (anexo 10)	Según diagnóstico de mantenimiento predictivo	Técnico electromecánico	\$ 2,385.00	\$ 2,385.00
						TOTAL	\$ 20,235.00

El objetivo de la implementación de un plan de mantenimiento que cumpla con los requerimientos según el entorno operacional de los equipos o sistemas, es reducir el riesgo de un impacto negativo en los costos de producción y reparación de fallos, es por ello que es importante conocer las proyecciones a futuro de cómo y cuánto será esta reducción. La siguiente tabla detalla las consecuencias por fallos esperados después de aplicado el plan de mantenimiento:

Tabla 4. Tabla de consecuencias por fallos esperados después de aplicado el plan de mantenimiento.

#	MODO DE FALLO	FRECUENCIA DE EVENTOS POR FALLO ESPERADOS	TPPR (hrs)	COSTO PRODUC. (\$)	COSTO REP. (\$)	RIESGO FUTURO ESPERADO \$/año	RIESGO FUTURO ESPERADO \$/año
1.a.1	Pararrayo de subestación dañado	1	3	357	450	807	807
1.a.2	Fusible primario de subestación disparado	1	1	119	50	169	169
2.a.1	Contactador de bypass de gabinete de control de pozo dañado	0	0	0	0	0	926
2.a.2	Banco de capacitores de gabinete de control de pozo dañado	0	0	0	0	0	
2.b.1	Relé de control de nivel de gabinete de pozo dañado	1	4	476	450	926	
3.a.1	Rodamientos de motor de eq. De pozo dañados	1	5	595	600	1195	1195
3.b.1	Devanado de motor eléctrico de pozo cortocircuitado	0	0	0	0	0	0
4.a.1	Pieza prensa estopas de cabezal de descarga dañada	0	0	0	0	0	0
4.a.2	Portacojinete dañado	0	0	0	0	0	16099
4.b.1	Bomba dañada	1	96	11424	4675	16099	
5.a.1	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua	0	0	0	0	0	15674
	Bajo nivel de agua, rejillas de pozo obstruidas	1	96	11424	4250	15674	
6.a.1	Diafragma de bomba dosificadora de hipoclorador dañado	0	0	0	0	0	0
7.a.1	Protector de voltaje de panel de control dañado	1	0	0	875	875	1325
7.b.1	Relé de sobrecarga dañado	1	0	0	450	450	
7.c.1	Rodamientos de motor eléctrico dañados	1	0	0	670	670	670
7.d.1	Eje estopero desgastado	0	0	0	0	0	0
7.e.1	Impulsores de bomba dañados	0	0	0	0	0	
7.f.1	Eje estopero desgastado	0	0	0	0	0	838
7.g.1	Válvulas de retención y compuerta dañadas	1	2	238	600	838	
7.h.1	Impulsores de bomba dañados	0	0	0	3370	0	0
COSTO TOTAL						\$ 37,703.00	\$ 37,703.00

Finalmente se obtiene los datos esperados, es decir, el indicador de ahorro potencial que se tendría después de aplicar la metodología RCM al sistema en estudio:

Tabla 5. Indicador de ahorro potencial esperado después de implementar el RCM.

#	MODO DE FALLO	ANTES DE APLICAR RCM		DESPUES DE APLICAR RCM		COSTOS DE PLAN DE MANTENIMIENTO	AHORRO POTENCIAL
		FRECUENCIA DE EVENTOS POR FALLO	RIESGO \$/año	FRECUENCIA DE EVENTOS POR FALLO ESPERADOS	RIESGO FUTURO ESPERADO \$/año		
1.a.1	Pararrayo de subestación dañado	1	807	1	807	0	0
1.a.2	Fusible primario de subestación disparado	1	169	1	169	0	0
2.a.1	Contactador de bypass de gabinete de control de pozo dañado	2	3680	0	0	1050	7210
2.a.2	Banco de capacitores de gabinete de control de pozo dañado	2	3654	0	0		
2.b.1	Relé de control de nivel de gabinete de pozo dañado	2	1852	1	926		
3.a.1	Rodamientos de motor de eq. De pozo dañados	2	5380	1	1195	450	3735
3.b.1	Devanado de motor eléctrico de pozo cortocircuitado	1	17424	0	0	975	16449
4.a.1	Pieza prensa estopas de cabezal de descarga dañada	1	2140	0	0	1125	1015
4.a.2	Portacojinete dañado	2	13948	0	0	4675	13198
4.b.1	Bomba dañada	1	20024	1	16099		
5.a.1	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua	3	3492	0	0	4250	2848
	Bajo nivel de agua, rejillas de pozo obstruidas	1	19280	1	15674		
6.a.1	Diafragma de bomba dosificadora de hipoclorador dañado	2	2252	0	0	1575	677
7.a.1	Protector de voltaje de panel de control dañado	2	1750	1	875	1050	275
7.b.1	Relé de sobrecarga dañado	2	900	1	450		
7.c.1	Rodamientos de motor eléctrico dañados	2	1340	1	670	450	220
7.d.1	Eje estopero desgastado	3	1650	0	0	1500	3800
7.e.1	Impulsores de bomba dañados	1	4200	0	0		
7.f.1	Eje estopero desgastado	1	550	0	0	750	1414
7.g.1	Válvulas de retención y compuerta dañadas	1	2452	1	838		
7.h.1	Impulsores de bomba dañados	1	3370	0	0	2385	985
			\$ 110,314.00		\$ 37,703.00	\$ 20,235.00	\$ 51,826.00

CONCLUSIONES

- El Mantenimiento Industrial constituye una actividad esencial para lograr un alto grado de eficiencia en la optimización de los recursos con los que se cuenta para tal fin, de allí la importancia de implementar una gestión que permita eliminar o reducir el riesgo de ocurrencias de eventos de fallos que produzcan altos costos económicos en la empresa. La filosofía del RCM, está diseñada justamente para obtener dichos resultados.
- Para el presente caso de estudio, se analizaron ocho equipos pertenecientes a diferentes sistemas que conforman la estación de bombeo y a través de una matriz de riesgo basada en la criticidad, se obtuvo la jerarquización de equipos, de acuerdo al nivel de impacto que causan la frecuencia y ocurrencia de eventos de fallo, en el entorno operacional actual, es decir antes de aplicar RCM. Los equipos con más alta criticidad son: El panel de control, El pozo maquinado profundo, el equipo de bombeo en pozo.
- Según los datos recabados de las bitácoras de servicio y órdenes de trabajo de la empresa que administra la estación de bombeo, en el entorno operacional sin la implementación del RCM, debido a que no se cuenta con una gestión adecuada de mantenimiento, se tiene un impacto en los costos de producción y reparación de fallos de \$110,314.00 dólares. El objetivo de la implementación del RCM, es justamente reducir ese costo, y para ello es necesario contar con un plan de mantenimiento que solvete esta situación.
- Para poder formular un plan de mantenimiento efectivo, se debe de realizar un análisis de causa raíz que permita identificar cuáles son las posibles causas que están produciendo los eventos de fallo, y con ello definir cuáles serán las actividades de mantenimiento a realizar con sus frecuencias y sus respectivos costos. El resultado de este análisis en el presente estudio, reflejó que las principales causas de los eventos de fallo, eran por la falta de implementación de una rutina de mantenimiento preventivo basado en condición y tiempo.
- Las actividades de mantenimiento preventivo basado en condición tienen por objeto, medir, verificar y/o analizar las condiciones de los equipos que forman parte del sistema de bombeo, para elaborar un historial de condiciones y verificar cuando estas entran en parámetros fuera de lo normal, ya que ello significa que existe un fallo en su etapa inicial, y deberán tomar las medidas del caso, para evitar que este cause un impacto mayor en el costo económico. El costo elevado provocado por los fallos según los datos históricos, se

puede apreciar que se han dado en el equipo de bombeo del pozo (bomba y cañería de columna), y en el pozo maquinado, ya que por falta de mantenimiento predictivo se llegó a condiciones de daño severo en estos equipos, es decir no se realizaron las respectivas actividades de mantenimiento en el tiempo oportuno, y ese tiempo oportuno es precisamente el que se define cuando se aplican actividades de mantenimiento preventivo.

- Los costos económicos que implicaría la implementación de un plan de mantenimiento adecuado al entorno operacional de la estación de bombeo, es de \$20,235.00 dólares, lo que representa el 19% de los costos que se tienen por eventos de fallos (sin la aplicación del RCM). Al implementar este plan de mantenimiento, se hace una proyección del riesgo que se tendría a futuro en la incidencia de modos de fallos, y este es de \$37,703.00, lo que representa el 34% de los costos que se tenían antes. El potencial de ahorro que se tendría, sería de \$51,826.00 ($\$110,314.00 - \$20,235.00 - \$37,703.00$), lo que equivale al 47% del costo que se tenía antes de implementar el RCM.

RECOMENDACIONES

- Las proyecciones del presente trabajo, están realizadas en los datos históricos de fallas ocurridas en un año, ya que no se obtuvo más información relacionada a este tema. Para una mejor evaluación de la situación actual en el área de mantenimiento, se recomienda evaluar un periodo mayor, para obtener una mayor precisión en el dato de la frecuencia de fallos ocurridos, y los costos que estos ocasionaron. Lo ideal sería un periodo de tres años.
- Para la implementación del RCM, se recomienda seguir rigurosamente el marco teórico descrito en el presente trabajo, en cuanto a las etapas que se deben de realizar desde el inicio, y los recursos con los que se debe contar, ya que esta metodología no se puede implementar de manera aislada sin contar con la participación del personal idóneo para formar el equipo de trabajo, es decir, no es responsabilidad del área, departamento o gerencia de mantenimiento.
- Al aplicar RCM, el resultado final esperado, no se obtiene a corto plazo. Se recomienda no realizar evaluaciones de resultados obtenidos prematuramente, sobre todo si se trata de definir la continuidad o no de la metodología. Según los expertos (PARRA C. &., 2016) en esta área, un tiempo prudencial para medir y evaluar resultados puede ser de tres años como mínimo, de allí que se debe robustecer la práctica de documentar todo lo relacionado con mantenimiento y su entorno operacional.

BIBLIOGRAFÍA

- PARRA, C. & CRESPO MÁRQUEZ, A. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de activos. Desarrollo y aplicación práctica de un Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM)*. Edita: INGEMAN España.



- PARRA, C. & CRESPO MÁRQUEZ, A. (2016). *Introducción a la Gestión de Activos. Introducción con las Técnicas de Ingeniería de Confiabilidad y Mantenimiento. Nota técnica 6: optimización de planes de Mantenimiento: Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (MCF). Reability Centered Maintenance (RCM)*. Edita: INGEMAN España.



- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *Vertical Turbine Pumps-Line Shaft and Sumersible Types*. EEUU: ANSI/AWWA E101-88, 1988.
- GARCÍA GARRIDO, S. (2006). *Organización y Gestión de Mantenimiento*. Primera edición, 2006. Madrid, Díaz de Santos.
- DECRETO NÚMERO DOS DE EL CONCEJO MUNICIPAL DE PERQUÍN, DEPARTAMENTO DE MORAZÁN. *Salón de Sesiones del Consejo Municipal de Perquín, Morazan, 23 de enero del 2020*. <https://www.jurisprudencia.gob.sv/DocumentosBoveda/D/2/2020-2029/2020/11/E1D02.PDF>
- SENA. (2012). *Operacion y mantenimiento de pozos profundos para acueductos*. Bogota: Colombia.
- MOTORS, US. (2006). *Manual de Instalación y mantenimiento*. Mexico.
- Pump, P. (2021). *Bombas verticales*. USA

ANEXOS

ANEXO 1: Registro de fallos ocurridos en el año 2019

# DE MODO DE FALLO	FECHA	DESCRIPCION DE FALLO	FRECUENCIA DE EVENTOS POR FALLO	TPPR (hrs)	COSTO PRODUCCION (\$)	COSTO REPARACION (\$)	COSTO TOTAL (\$)
1.a.1	03-ene-19	Falla en pararrayo de subestación	1	3	357	450	807
1.a.2	07-ene-19	Disparo de fusible primario de subestación	1	1	119	50	169
2.a.1	10-ene-19	Falla en contactor de bypass de gabinete de control de pozo	2	10	1190	650	3680
	12-oct-19						
2.a.2	02-feb-19	Falla en capacitores de gabinete de control de pozo	2	8	952	875	3654
	22-jul-19						
2.b.1	13-feb-19	Falla en relé de nivel de gabinete de control de pozo	2	4	476	450	1852
	30-may-19						
3.a.1	26-feb-19	Falla en rodamientos de motor de eq. De pozo	2	10	1190	1500	5380
	15-dic-19						
3.b.1	01-mar-19	Falla en devanado de motor eléctrico de pozo	1	96	11424	6000	17424
4.a.1	08-mar-19	Falla en eje estopero de cabezal de descarga eq. De pozo	1	10	1190	950	2140
4.a.2	17-mar-19	Falla en tubería de columna de pozo	2	36	4284	2690	13948
	05-nov-19						
4.b.1	03-abr-19	Falla en tubería de columna y bomba de pozo	1	96	11424	8600	20024
5.a.1	11-abr-19	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua	3	6	714	450	3492
	03-may-19	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua					
	13-jun-19	Disparo de equipo de pozo por bajo nivel de agua					
	27-jun-19	Falla de bajo nivel de agua, rejillas de pozo obstruidas (toma de video)	1	120	14280	5000	19280
6.a.1	19-may-19	Falla bomba dosificadora de hipoclorador	2	4	476	650	2252
	11-ago-19						
7.a.1	02-feb-19	Falla en panel de control de eq. # 1 de rebombeo	2	0	0	875	1750
	23-ago-19						
7.b.1	01-mar-19	Falla en panel de control de eq. # 2 de rebombeo	2	0	0	450	900
	11-sep-19						
7.c.1	02-jun-19	Falla en rodamientos de motor de eq. # 1 de rebombeo	2	0	0	670	1340
	25-sep-19						
7.d.1	18-ene-19	Falla en eje estopero de cabezal de descarga eq. # 1 rebombeo	3	0	0	550	1650
	22-may-19						
	09-oct-19						
7.e.1	26-oct-19	Falla en bomba de eq. # 1 De rebombeo (stand by)	1	0	0	4200	4200
7.f.1	14-nov-19	Falla en eje estopero de cabezal de descarga de eq # 2	1	0	0	550	550
7.g.1	08-dic-19	Falla en válvulas de retención y compuerta de eq. De rebombeo	1	8	952	1500	2452
7.h.1	27-dic-19	Falla en bomba de eq. # 2 De rebombeo (stand by)	1	0	0	3370	3370
					COSTO TOTAL		\$ 110,314.00

ANEXO 2: Detalle de costos por actividad de mantenimiento preventivo a gabinetes de control de equipos de bombeo

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA GABINETES DE CONTROL DE EQUIPOS DE BOMBEO	
PLANTA: _____	EQUIPO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos de gabinete de control	
Voltaje de control: _____	
Voltaje de fuerza: _____	
Potencia: _____	
Tipo de arranque:	
A voltaje reducido por autotransformador	<input type="checkbox"/>
Arranque suave con contactor de estado sólido	<input type="checkbox"/>
Arranque directo	<input type="checkbox"/>
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCIÓN	Costo \$
Limpieza general de gabinete	<input style="width: 80px;" type="text" value="\$ 25.00"/>
Incluye la limpieza interior y exterior del gabinete con aspiradora y wype	
Medición parámetros eléctricos	<input style="width: 80px;" type="text" value="\$ 60.00"/>
Medición de parámetros eléctricos, Voltaje, corriente, potencia, factor de potencia. Utilizar equipo analizador de calidad de energía	
Revisión y calibración de protecciones	<input style="width: 80px;" type="text" value="\$ 150.00"/>
Calibrar relé de sobrecarga Calibrar guardamotor Calibrar relé protector de voltaje Ajustar y/o calibrar protecciones termo magnéticas (si aplica) Ajustar y/o calibrar parámetros de contactor de estado sólido (si aplica) Ajustar y/o calibrar parámetros de variador de frecuencia (si aplica)	
Revisión de contactores de fuerza y control	<input style="width: 80px;" type="text" value="\$ 50.00"/>
Desarmar contactores y limpiar contactos y/o reemplazarlos (si aplica), reapretar todos los tornillos o pernos del circuito magnético	
Revisión de puntos de conexión	<input style="width: 80px;" type="text" value="\$ 65.00"/>
Incluye la revisión y el reemplazo de cables recalentados que provoquen puntos calientes	
COSTO TOTAL	<input style="width: 80px;" type="text" value="\$ 350.00"/>

ANEXO 3: Detalle de costos por actividad de mantenimiento preventivo a equipo clorador

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EQUIPO CLORADOR	
PLANTA: _____	EQUIPO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos de tanque para solución:	Datos de bomba dosificadora eléctrica:
Material: _____	Marca: _____
Dimensiones: _____	Modelo: _____
Capacidad: _____	Serie: _____
Datos de removedor:	Voltaje: _____
Marca: _____	Corriente: _____
Voltaje: _____	Potencia: _____
Corriente: _____	Frecuencia: _____
Potencia: _____	RPM: _____
RPM: _____	Flujo: _____
	CDT: _____
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCION	Costo \$
Actividades en tanque de solución	\$ 50.00
Revisión y limpieza	20
Cambio de empaques y/sellos	30
Actividades en removedor	\$ 150.00
Medición de parámetros eléctricos	25
Desarmado y armado	20
Limpieza general	10
Revisión de aspas	10
Cambio de rodamientos	85
Actividades a bomba dosificadora eléctrica y otros	\$ 325.00
Medición de parámetros eléctricos	25
Desarmado y armado de bomba	50
Limpieza general	10
Revisión del cabezal del reactivo	10
Revisión y limpieza de filtro	25
Cambio de sellos, empaques y juntas	50
Revisión y/o cambio de diafragma	100
Revisión de válvula liberadora de presión	5
Revisión de válvulas de retención (succión y descarga)	5
Revisión de válvulas de servicio	5
Revisión de mangueras y acoples	5
Lubricación de engranajes	25
Revisión del torque del perno del cabezal del reactivo	10
COSTO TOTAL	\$ 525.00

ANEXO 4: Detalle de costos por actividad de mantenimiento preventivo a pozo profundo

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA POZO PROFUNDO PARA EXPLOTACIÓN DE AGUA	
PLANTA: _____	POZO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos del Pozo	
Profundidad:	_____
Ø de revestimiento:	_____
Material de revestimiento:	_____
Caudal de explotación:	_____
Nivel estático:	_____
Nivel Dinámico:	_____
Nivel de setting:	_____
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCION	Costo \$
Limpieza de pozo profundo	\$ 4,250.00
Movilización y desmovilización de máquina	350
Toma de video interior de pozo	400
Limpieza mecánica	500
Limpieza química (aplicación y agitado)	1500
Limpieza hidroneumática (inyección de aire comprimido)	1500
COSTO TOTAL	\$ 4,250.00

ANEXO 5: Detalle de costos por actividad de mantenimiento predictivo a motores eléctricos de equipos de bombeo y rebombeo

MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA MOTORES ELECTRICO DE EQUIPOS DE BOMBEO EN POZO Y REBOMBEO	
PLANTA: _____	EQUIPO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos de motor eléctrico	
Voltaje: _____	
Corriente nominal: _____	
Potencia: _____	
RPM: _____	
Modelo: _____	
Serie #: _____	
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCION	Costo \$
Medición parámetros eléctricos	\$ 75.00
Corriente	
Voltaje	
Potencia	
Frecuencia	
Aislamiento de devanado estático	
Aislamiento de alimentadores	
Medición de parámetros mecánicos	\$ 150.00
Velocidad	
Temperatura	
Vibración	
COSTO TOTAL	\$ 225.00

ANEXO 6: Detalle de costos por actividad de mantenimiento preventivo a motor eléctrico de equipo de bombeo de pozo

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA MOTOR ELÉCTRICO DE EQUIPOS DE BOMBEO	
PLANTA: _____	EQUIPO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos de motor eléctrico	
Voltaje: _____	
Corriente nominal: _____	
Potencia: 200 HP	
RPM: _____	
Modelo: _____	
Serie #: _____	
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCION	Costo \$
Medición parámetros eléctricos	\$ 75.00
Corriente	
Voltaje	
Potencia	
Frecuencia	
Aislamiento de devanado estatórico	
Aislamiento de alimentadores	
Medición de parámetros mecánicos	\$ 150.00
Velocidad	
Temperatura	
Vibración	
Reemplazo de partes y otros	\$ 750.00
Limpieza general	
Revisión de lineabilidad de eje terminal	
Cambio de balero superior	
Cambio de balero inferior	
Cambio de aceite	
Aplicación de barniz en devanado estatórico (si aplica)	
Pintura exterior de motor	
COSTO TOTAL	\$ 975.00

ANEXO 7: Detalle de costos por actividad de mantenimiento preventivo a motores eléctricos de equipos de rebombeo

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA MOTOR ELECTRICO DE EQUIPOS DE REBOMBEO	
PLANTA: _____	EQUIPO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos de motor eléctrico	
Voltaje: _____	
Corriente nominal: _____	
Potencia: <u>75 HP</u>	
RPM: _____	
Modelo: _____	
Serie #: _____	
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCION	Costo \$
Medición parámetros eléctricos	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">\$ 75.00</div>
Corriente	
Voltaje	
Potencia	
Frecuencia	
Aislamiento de devanado estatórico	
Aislamiento de alimentadores	
Medición de parámetros mecánicos	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">\$ 150.00</div>
Velocidad	
Temperatura	
Vibración	
Reemplazo de partes y otros	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">\$ 500.00</div>
Limpieza general	
Revisión de lineabilidad de eje terminal	
Cambio de balero superior	
Cambio de balero inferior	
Cambio de aceite	
Aplicación de barniz en devanado estatórico (si aplica)	
Pintura exterior de motor	
COSTO TOTAL	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">\$ 725.00</div>

ANEXO 8: Detalle de costos por actividad de mantenimiento predictivo a columna y bomba de equipos de bombeo

MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA CABEZAL, COLUMNA Y BOMBA DE EQUIPOS DE POZO Y REBOMBEO	
PLANTA: _____	EQUIPO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos de cabezal de descarga:	Datos de columna de succión:
Material: _____	Material de caño: _____
Ø de succión: _____	Ø y long.De caño: _____
Ø de descarga: _____	Cantidad de caños: _____
Datos de la bomba:	Material de ejes: _____
Marca: _____	Ø y long.De ejes: _____
Modelo: _____	Ø de manguito de ejes: _____
Serie: _____	Cantidad de ejes: _____
Caudal: _____	Material de portacojinete: _____
CDT: _____	Material de cojinete: _____
RPM: _____	Cantidad de portacojinetes: _____
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCION	Costo \$
Medición de parámetros eléctricos	\$ 125.00
Corriente	
Voltaje	
Potencia (Kw, Kvar)	
Factor de potencia	
Medición de parámetros mecánicos y otros	\$ 125.00
Velocidad	
Desplazamientos	
Aceleración	
Temperatura	
Medición de parámetros hidráulicos	\$ 125.00
Caudal	
Presión	
Potencia	
COSTO TOTAL	\$ 375.00

ANEXO 9: Detalle de costos por actividad de mantenimiento preventivo a columna y bomba de equipo de bombeo en pozo

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA CABEZAL, COLUMNA Y BOMBA DE POZO	
PLANTA: _____	EQUIPO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos de cabezal de descarga:	Datos de columna de succión:
Material: _____	Material de caño: _____
Ø de succión: _____	Ø y long.De caño: _____
Ø de descarga: _____	Cantidad de caños: _____
Datos de la bomba:	Material de ejes: _____
Marca: _____	Ø y long.De ejes: _____
Modelo: _____	Ø de manguito de ejes: _____
Serie: _____	Cantidad de ejes: _____
Caudal: _____	Material de portacojinete: _____
CDT: _____	Material de cojinete: _____
RPM: _____	Cantidad de portacojinetes: _____
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCION	Costo \$
Medición de parámetros eléctricos	\$ 125.00
Corriente	
Voltaje	
Potencia (Kw, Kvar)	
Factor de potencia	
Medición de parámetros mecánicos y otros	\$ 250.00
Velocidad	
Desplazamientos	
Aceleración	
Temperatura	
Medición de parámetros hidráulicos	\$ 125.00
Caudal	
Presión	
Potencia	
Vibración	
Actividades a cabezal y columna	\$ 3,150.00
Desmontaje y montaje de equipo de bombeo de pozo	2500
Limpieza y revisión de cañería, roscas y camisas	150
Limpieza y revisión lineabilidad de ejes	150
Limpieza y revisión de cojinete y portacojinete	50
Limpieza y revisión de cabezal de descarga	60
Revisión de pieza estopera	25
Cambio de buje estopero	40
Cambio de eje estopero	125
Cambio de empaquetadura de estopero	50
Actividades a bomba	\$ 1,025.00
Desarmado y armado de bomba	75
Limpieza general	25
Revisión de lineabilidad de eje	25
Revisión de tazones	75
Cambio de bujes de tazón	350
Revisión de impulsores	50
Cambio de anillo de apriete de impulsor	350
Pintura exterior de bomba	75
COSTO TOTAL	\$ 4,675.00

ANEXO 10: Detalle de costos por actividad de mantenimiento preventivo a columna y bomba de equipos de rebombeo

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA CABEZAL, COLUMNA Y BOMBA DE REBOMBEO	
PLANTA: _____	EQUIPO # : _____
FECHA: _____	
TIEMPO PROMEDIO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD: _____	
Datos de cabezal de descarga:	Datos de columna de succión:
Material: _____	Material de caño: _____
Ø de succión: _____	Ø y long.De caño: _____
Ø de descarga: _____	Cantidad de caños: _____
Datos de la bomba:	Material de ejes: _____
Marca: _____	Ø y long.De ejes: _____
Modelo: _____	Ø de manguito de ejes: _____
Serie: _____	Cantidad de ejes: _____
Caudal: _____	Material de portacojinete: _____
CDT: _____	Material de cojinete: _____
RPM: _____	Cantidad de portacojinetes: _____
COSTOS DE ACTIVIDADES	
DESCRIPCION	Costo \$
Medición de parámetros eléctricos	\$ 125.00
Corriente	
Voltaje	
Potencia (Kw, Kvar)	
Factor de potencia	
Medición de parámetros mecánicos y otros	\$ 250.00
Velocidad	
Desplazamientos	
Aceleración	
Temperatura	
Medición de parámetros hidráulicos	\$ 125.00
Caudal	
Presión	
Potencia	
Vibración	
Actividades a cabezal y columna	\$ 860.00
Desmontaje y montaje de equipo de bombeo de pozo	500
Limpieza y revisión de cañería, roscas y camisas	25
Limpieza y revisión lineabilidad de ejes	25
Limpieza y revisión de cojinete y portacojinete	10
Limpieza y revisión de cabezal de descarga	60
Revisión de pieza estopera	25
Cambio de buje estopero	40
Cambio de eje estopero	125
Cambio de empaquetadura de estopero	50
Actividades a bomba	\$ 1,025.00
Desarmado y armado de bomba	75
Limpieza general	25
Revisión de lineabilidad de eje	25
Revisión de tazones	75
Cambio de bujes de tazón	350
Revisión de impulsores	50
Cambio de anillo de apriete de impulsor	350
Pintura exterior de bomba	75
COSTO TOTAL	\$ 2,385.00