



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

“MEJORA DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE
TABLEROS DE CONTROL ELÉCTRICO Y SU
INFLUENCIA EN LA CONFIABILIDAD DEL ÁREA DE
SERVICIOS DE UNA EMPRESA MINERA”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Autores:

Bach. Carrillo Beunza, Pablo
Bach. Saire Chani, Rafael

Asesor:

Ing. Mg. Katherine del Pilar Arana Arana

Cajamarca - Perú

2020

DEDICATORIA

A todos los profesionales que con esfuerzo y dedicación tratan de mejorar de forma personal, tratando a su vez de cambiar el mundo en un mejor lugar donde vivir.

AGRADECIMIENTO

Para desarrollar el siguiente trabajo de investigación nos ha sido de vital importancia el soporte de personas e instituciones que me ha permitido ir mejorando su contenido a través del tiempo, así como la validez del mismo al poder recopilar información histórica e importante para realizar el diagnóstico, estudio, análisis y evaluación técnica – económica.

Agradecer a la empresa por permitirnos ser parte del equipo de trabajo con quien aplicamos parte de la implementación de las propuestas.

El agradecimiento eterno a la Universidad Privada del Norte por brindarnos la oportunidad de seguir la carrera en Ingeniería Industrial que sin duda ha incrementado nuestras capacidades profesionales permitiéndonos tener un mayor campo de acción para emprender proyectos y mejoras continuas durante los siguientes años de nuestra vida profesional. Una especial atención a la Ing. Mg. Katerine del Pilar Arana Arana quien nos ha brindado información constante de la parte metodológica y estructural durante todo este proceso del desarrollo de este trabajo de investigación.

A todas las personas con quienes hemos interactuado para poder desarrollar un trabajo consistente y sustentable que pueda servir de referencia para los siguientes profesionales dedicados al campo de la ingeniería.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	10
RESUMEN.....	11
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Realidad problemática.....	12
1.2. Formulación del problema.....	18
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	18
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	18
1.4. Hipótesis.....	19
1.4.1. <i>Hipótesis general</i>	19
1.4.2. <i>Hipótesis específicas</i>	19
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	20
2.1. Tipo de Investigación.....	20
2.2. Materiales, Instrumentos y Métodos.....	21
2.2.1. <i>Materiales</i> :.....	21
2.2.2. <i>Instrumentos</i>	21

2.2.3. Métodos.....	25
2.3. Procedimiento.....	32
2.4. Operacionalización de Variables.....	36
CAPÍTULO III. RESULTADOS	38
3.1 Diagnóstico actual de la gestión de mantenimiento preventivo del área de servicios	38
3.1.1 <i>Mapa de procesos de la gestión de mantenimiento del área de servicios</i>	38
3.1.2 <i>Proceso y funcionamiento de los equipos que pertenecen al área de servicios</i>	42
3.1.3 <i>Categorización y análisis de los modos de falla críticos.....</i>	58
3.1.3.1 <i>Identificación de los Modos de Falla Críticos.....</i>	58
3.1.3.2 <i>Análisis de los modos de falla críticos.....</i>	60
3.2.3 <i>Desempeño de los principales indicadores de gestión de mantenimiento del área de servicios</i>	62
(1) <i>Costos.....</i>	62
(2) <i>Nivel de cumplimiento de trabajos programados.....</i>	64
(3) <i>Tiempo promedio entre fallas – MTBF.....</i>	67
(4) <i>Trabajos realizados en tableros de control eléctrico</i>	68
3.2 Análisis de confiabilidad de los tableros de control eléctrico.....	70
3.2.2 <i>Cálculo de confiabilidad de acuerdo a los tiempos promedios de falla - MTBF</i>	71
3.3 Propuesta de plan de mejora para la gestión de mantenimiento del área de servicios	75

3.3.1	<i>Mejora del Proceso de Mantenimiento del área de servicios.....</i>	75
3.3.2	<i>Implementación de estrategias de mantenimiento de acuerdo a los modos de falla críticos identificados.....</i>	78
3.3.3	<i>Implementación de un programa de mantenimiento predictivo</i>	84
3.3.4	<i>Implementación de un sistema de indicadores para el control frecuente del desempeño de los tableros de control eléctrico</i>	92
3.5	Resultados obtenidos de acuerdo a las dimensiones de las variables estudiadas.....	96
3.5	Evaluación de la viabilidad técnica y económica del proyecto de investigación.....	98
3.5.1	<i>Factibilidad económica del proyecto de investigación.....</i>	98
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES		102
4.1	Discusión.....	102
4.2	Conclusiones	107
REFERENCIAS		109
ANEXOS		112
Anexo 01: Extracto de base de datos para el análisis de información.....		113
Anexo 02: Modelo para la configuración de los sensores de los tableros de control eléctrico		113
Anexo 03: Modelos de Check list para inspección de tableros de control eléctrico		115
Anexo 04: Modelo de registro de datos de termografía		116
Anexo 05: Registro fotográfico de tableros de control eléctrico.....		117

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Matriz de Técnicas e Instrumentos</i>	23
Tabla 2: Lista de Verificación de Técnicas e Instrumentos.....	24
<i>Tabla 3: Tabla de operacionalización de variables</i>	36
Tabla 4: Variación de costos 2018 vs 2019.....	64
<i>Tabla 5: Resumen de trabajos ejecutados 2019</i>	65
Tabla 6: Prueba de bondad de ajuste	71
<i>Tabla 7: Estimaciones ML de los parámetros de distribución</i>	72
<i>Tabla 8: Parámetros de la distribución normal de los tableros de control eléctrico</i>	73
Tabla 9: Comparación entre indicadores actuales y esperados luego de la implementación del plan de mejora.....	96
Tabla 10: Detalle de la inversión y fuentes de ingreso para el flujo anual de efectivo	100
Tabla 11: Flujo de caja de la propuesta de mejora de la gestión de mantenimiento	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Flujo para realizar el proceso RCM.....	27
<i>Figura 2: Mapa de Procesos de Mantenimiento del área de servicios.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3: Partes principales de una bomba centrífuga – Horizontal.....</i>	<i>42</i>
Figura 4: Partes principales de una bomba centrífuga - Vertical	43
Figura 5: Modelos de Motores eléctricos utilizados al aire libre	45
Figura 6: Modelos de Motores eléctricos sumergibles en agua	45
Figura 7: Detalle de partes de una electrobomba Flygt 2400.402.....	46
<i>Figura 8: Detalle de partes Tablero de control Eléctrico</i>	<i>48</i>
<i>Figura 9: Instalación de Sensor de Protección por Temperatura RTD.....</i>	<i>49</i>
Figura 10: Esquema básico de un sistema de instrumentación y telemetría	50
Figura 11: Representación gráfica de la capa Freática.....	50
<i>Figura 12: Capa Freática del tajo en Minería a tajo abierto.....</i>	<i>51</i>
Figura 13: Representación gráfica de un Pozo profundo	54
Figura 14: Representación gráfica de una Poza	56
Figura 15: Representación gráfica de un Tanque de Rebombeo.....	57
Figura 16: Pareto de las actividades de mantenimiento con mayor demanda.....	58
Figura 17: Pareto de actividades frecuente de mantenimiento	59
Figura 18: Matriz de Modos de falla, efectos y criticidad de los tableros de control eléctrico	61
Figura 19: Comparación de costos reales vs presupuestados 2018 - 2019.....	63
Figura 20: Total de trabajos programados vs no programados	65
Figura 21: Cumplimiento del plan durante el 2019.....	66
Figura 22: Tiempos promedios entre fallas de los tableros de control eléctrico	67

Figura 23: Porcentaje de trabajos realizados en tableros de control eléctrico durante el 2018	69
Figura 24: Porcentaje de trabajos realizados en tableros de control eléctrico durante el 2019	69
Figura 25: Confiabilidad de los tableros de control eléctrico.....	74
Figura 26: Mapa de proceso con la mejora propuesta para optimizar la gestión de mantenimiento	77
Figura 27: Acciones recomendadas para cada modo de falla de acuerdo a la Matriz de falla, efectos y criticidad de los tableros de control eléctrico.....	80
Figura 28: Registro termográfico de las llaves de control en un tablero de control eléctrico	85
Figura 29: Registro termográfico a las conexiones internas dentro del tablero de control eléctrico	85
Figura 30: Demostración del uso de la cámara termográfica para el monitoreo de temperaturas.....	86
Figura 31: Representación gráfica de la Curva P-F.....	87
Figura 32: Comportamiento de los diferentes parámetros evaluados como parte del mantenimiento Predictivo.....	89
Figura 33: Modelo de límites permisibles de temperatura	90
Figura 34: Modelo de integración y desarrollo de las estrategias de mantenimiento.....	91
Figura 35: Tablero de Indicadores de Reporte General de Equipos.....	93
Figura 36: Reporte de Top Ten por Estructuras Operativas	94
Figura 37: Reporte de Top Ten por Razones de parada	95

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula para calcular el WACC	35
Ecuación 2: Fórmula para el cálculo de la confiabilidad.....	74

RESUMEN

Como parte del trabajo de investigación se pretende demostrar los beneficios de implementar mejoras dentro del proceso de la Gestión de Mantenimiento aplicado a los tableros de control eléctrico del área de servicios de una empresa minera. Para ello se ha logrado reducir en 16% la desviación de los costos con respecto a lo presupuestado, así como el incremento de los tiempos promedios entre fallas en 13.64% lo que representa un incremento de la confiabilidad hasta del 17.52% y por ende también el aumento disponibilidad al contar con mayores horas de operación de los sistemas de bombeo evaluados durante los años 2018 y 2019.

Dentro de nuestro análisis nos hemos enfocado en la metodología del análisis de confiabilidad RCM en base a los modos de falla más comunes que afectan la operación normal de estos componentes, aplicando para ello estrategias combinadas de las técnicas de mantenimiento tales como: Correctivo, preventivo y predictivo, soportados mediante la matriz de análisis de modos de falla, efecto y criticidad FMECA.

Mediante la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, se pudo realizar la identificación de los equipos críticos de un sistema de bombeo donde se define que uno de los componentes que afectan severamente la operación de los otros componentes, tales como motor y/o bomba, son los tableros eléctricos, que controlan las variables principales de operación y cuyo análisis es necesario para incrementar la confiabilidad de los equipos.

Palabras clave: Gestión de mantenimiento, confiabilidad, estrategias, planeamiento, Tableros de control eléctrico

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El proceso de globalización obliga a todas las empresas, independientes de su tamaño y sector en cual participan, a confrontarse permanentemente a nivel mundial con otras empresas de su sector para poder competir y mantener altos niveles de rentabilidad que las hagan sostenibles durante su ciclo de vida, por lo que necesitan abordar nuevos desafíos para lograr alcanzar la competitividad según estándares internacionales, lo que debería afrontar de manera inteligente y responsable buscando permanentemente su diferenciación, en caso contrario, arriesga su permanencia en el mercado con las negativas consecuencias que ella implica (Díaz Fuentes, Hoyo Aparicio, & Marichal Salinas, 2017).

A lo largo de la historia, el mantenimiento ha ido evolucionando según la necesidad industrial enfocándose para ello en lograr una mayor confiabilidad de los equipos, procesos y personas permitiendo que el área de mantenimiento evolucione hacia un campo más especializado. Atendiendo a esa afirmación pensamos y defendemos que sólo hay dos formas posibles de hacer el mantenimiento; planificado y no planificado y que las buenas prácticas que conducen a la excelencia en mantenimiento indican que el reparto porcentual entre estos dos estados debe ser 80% planificado y 20% para el mantenimiento no planificado o mantenimiento correctivo (Integrated Asset Management, 2019). A partir de la Primera Guerra Mundial y, sobre todo, de la Segunda, aparece el concepto de confiabilidad y los departamentos de mantenimiento buscan no sólo solucionar las fallas que se producen en los equipos, sino, sobre todo, prevenirlas, actuar para que no se produzcan paradas no planificadas. Esto supone crear una nueva figura en los departamentos de mantenimiento: personal cuya función es estudiar qué tareas de mantenimiento deben realizarse para evitar las fallas. (García,

2010) Por tal razón para aumentar la confiabilidad de los equipos, maquinarias, y personas, debemos implementar un sistema de gestión de mantenimiento que se encuentre diseñado para atender las necesidades de los equipos que estén siendo administrados.

La confiabilidad se define como la probabilidad que un elemento funcione, sin fallar, durante un tiempo determinado bajo condiciones ambientales y de entorno preestablecidas por el usuario (Area de Innovación y Desarrollo, 2017). En relación a ello el área de Mantenimiento es la responsable de asegurar que los equipos o activos mantengan una confiabilidad aceptable a los requerimientos del cliente, en este caso, el área de operaciones valiéndose para ello de todas las herramientas, metodologías, criterio y buenas prácticas de las industrias de su sector para alcanzar la confiabilidad aceptable. Si bien es cierto que el término de confiabilidad se utiliza más como un término cualitativo (malo, regular, bueno, excelente) al tratarse de un parámetro probabilístico, es posible realizar cálculos matemáticos con la finalidad de establecer un seguimiento de esta variable a lo largo del tiempo en periodos evaluables (meses) así como el de definir los límites aceptables en los que debería trabajar los equipos, realizando acciones oportunas y pro activas cada vez que el desempeño de los equipo se encuentren por debajo de los esperado.

Las empresas mineras cuentan con un área especializada en realizar el manejo de las aguas subterráneas que se generan comúnmente como parte del proceso de extracción y/o movimiento de tierra, bajando constantemente la capa freática conforme vayan avanzando las actividades de minado. Es por ello que es de vital importancia el administrar correctamente este recurso del agua que permita en primer lugar asegurar que las operaciones se desarrollen con normalidad, así como, el de cumplir con los

compromisos sociales con las comunidades aledañas entregando las cantidades acordadas de agua de acuerdo al requerimiento de éstas.

Para nuestro caso de estudio, el área de mantenimiento servicios mina está encargado de la reparación y mantenimiento de los sistemas de bombes que están conformados principalmente por: un motor, una bomba, una electrobomba y un tablero eléctrico para trabajar bajo condiciones normales de operación. La importancia de los equipos de bombeo es de vital importancia para avanzar con las labores de minado, pues al ir extrayendo el mineral se va profundizando el terreno, así el nivel freático estará más cerca de la superficie, dicho de esta forma los tableros eléctricos son parte de este proceso ya que son los que entregan la energía eléctrica de manera regulada a los motores y éstos a la vez convierten la energía eléctrica a energía mecánica para transferir movimiento a las bombas y succionar el agua del tajo y pozas siendo derivarlas a puntos de rebombeo para así poder cumplir con los compromisos que ha asumido la empresa.

El método propuesto en el siguiente trabajo de investigación para aumentar la confiabilidad de los equipos es el del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – RCM el cual se enfoca en la identificación de los modos de falla más críticos que no permiten que el activo cumpla con sus funciones primarias y/o secundarias, para ello se sigue una secuencia ordenada de estratificación de pasos que permitirán implementar estrategias adecuadas de acuerdo al modo de falla analizado; dentro de las estrategias que encontramos están la del mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo y el mantenimiento correctivo.

Actualmente el área de Mantenimiento se enfoca en los mantenimientos Preventivo y Correctivo, sin embargo, se han identificado varias oportunidades de mejora que deberán ser implementadas para incrementar la confiabilidad de los tableros eléctricos

y por ende de los sistemas de bombeo que vendrían a ser el objetivo final del presente trabajo de investigación.

Durante el proceso de operación se ha recopilado datos históricos de paradas correctivas del periodo 2018 donde se puede apreciar que una de las causas que genera el mayor impacto dentro del proceso de reparación en el mantenimiento no programado es la identificación de paradas de tableros variadores por fallas recurrentes, por mantenimientos deficientes o que no se han hecho por un correcto plan de trabajo. Como medida correctiva al problema se han estado realizando limpiezas por condición o programación, que consiste en aplicar aire comprimido cada vez que presentaban fallas y considerando que esta actividad se realiza en campo la limpieza no era eficiente ya que estaba expuesto a contaminantes externos como polvo y agua, del medio ambiente. Si bien las inspecciones periódicas generalmente se efectúan una vez al año, es posible que la frecuencia se deba incrementar con variadores en entornos agresivos o donde su uso sea más continuo. (Manual Yaskawa, 2010).

Se ha identificado que los tableros eléctricos se encuentran dentro de las diez principales causas de paradas de estructuras en el área de servicios mina por lo que es de vital interés el de analizar este componentes con la finalidad de implementar acciones de mejora que permitan incrementar su confiabilidad y por ende los demás indicadores claves de la gestión de mantenimiento, tales como la disponibilidad, el incremento de las horas de operación y la reducción de los costos operativos, de esta manera aseguramos que el proceso de producción y el cumplimiento de los compromisos de la empresa se cumpla.

“Estandarizar” es la forma preestablecida de llevar a cabo una actividad dada, el estandarizar las actividades es el requisito básico para poder contar con un proceso ordenado y medible en el tiempo el cual permitirá analizar y mejorar mediante la toma

de decisiones soportado sobre información consistente, además permite que el personal realice las actividades de mantenimiento de manera segura, sin contratiempos y en menores tiempos que los habituales.

En los sistemas eléctricos, la inspección mediante termografía infrarroja permite identificar, con bastante facilidad, los problemas causados por un aumento de la resistencia eléctrica descritos por su efecto sobre el calor disipado que, a su vez incrementa la resistencia eléctrica en un proceso, que se ha comentado, se retroalimenta y se puede llevar, fácilmente, a la fusión de los componentes. La termografía viene a formar parte de la estrategia de mantenimiento predictivo por lo que su evaluación resulta ser beneficiosa para el presente trabajo de investigación.

El presente estudio abarca cada uno de los cuatro objetivos específicos propuestos.

En la primera etapa se realizará un diagnóstico de la situación actual del desempeño de la gestión de mantenimiento del área de servicios, así como del estado de los equipos que conforman un sistema de bombeo los cuales están distribuidos en los diferentes procesos mineros para cumplir con los planes propuestos por la empresa, considerando para ello el impacto en los costos totales del área, su disponibilidad operativa y su confiabilidad. Esta información analizada proviene de la recolección de datos de las áreas internas de la empresa como son el de planeamiento y ejecución, Operaciones mina y el área de costos de mantenimiento.

El análisis de la confiabilidad se realizará mediante técnicas de recolección directa del área del Planeamiento quienes registran la información de manera frecuente, con ello nos enfocaremos en los sistemas y equipos que presentan menores resultados, así mismo, nos orientará mejor en cuanto al impacto al que están sometidos los equipos

de acuerdo a los diferentes modos de falla presentes según el contexto operativo al cual están expuestos.

En la segunda etapa realizaremos cálculos numéricos para identificar el nivel de confiabilidad a modo cuantitativo el cual nos permitirá analizar mediante series temporales el desempeño de los equipos para poder advertir desviaciones, aplicando para ello acciones correctivas y oportunas. Para ello es importante analizar el conjunto de los sistemas de bombeo e ir analizando mediante el método deductivo el impacto que representan los tableros eléctricos para cumplir con la disponibilidad y confiabilidad de todo el sistema. Se aplica además la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – RCM para identificar los modos de falla típicos presentes durante su operación normal, es de acuerdo a este análisis el que podemos identificar las tareas que sean técnicamente factibles de ser implementadas.

En la tercera etapa, se proponen las mejoras al proceso de gestión de mantenimiento mediante la secuencia detallada de los siete pasos para aplicar la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad – RCM, aplicando mejoras para cada modo de falla crítico identificados en las etapas previas.

En la cuarta etapa se procederá a evaluar financieramente el impacto de la implementación de las mejoras, para ello se hará uso de los indicadores financieros de rentabilidad del proyecto como son el WACC, VAN y TIR cuyos resultados evaluados en un periodo de 10 años nos permitirá obtener un flujo de caja positivo y un retorno de inversión aceptable de acuerdo a la magnitud de la inversión productos de esta implementación de estrategias de mantenimiento.

1.2. Formulación del problema

¿De qué manera la mejora de la gestión de mantenimiento de tableros de control eléctrico influye en la confiabilidad del área de servicios de una empresa minera?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la influencia que tiene la mejora de la gestión de mantenimiento del área de servicios en la confiabilidad de los tableros de control eléctrico en una empresa minera.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico de la gestión de mantenimiento del área de servicios de una empresa minera relacionados a los tableros de control eléctrico.
- Analizar la confiabilidad actual de los tableros de control eléctrico y su impacto en los sistemas de bombeo del área de servicios de una empresa minera.
- Establecer el plan de mejora para la gestión de mantenimiento del área de servicios relacionados a los tableros de control eléctrico.
- Evaluar técnica y financieramente la implementación del plan de mejora propuesto.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

La mejora de la gestión de mantenimiento del área de servicios influirá en la confiabilidad de los tableros de control eléctrico de una empresa minera.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Existen deficiencias significativas de la actual gestión de mantenimiento del área de servicios en relación a los tableros de control eléctrico.
- La confiabilidad de los tableros de control eléctrico se encuentra por debajo de los límites aceptables.
- El plan de mejora propuesto incrementa la confiabilidad de los tableros de control eléctrico por encima de los límites aceptables.
- El evaluación técnica y económica del plan de mejora propuesto se encuentran por encima de los indicadores financieros (VAN y TIR)

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de Investigación

Según su Propósito: Aplicada

Esto debido a que la investigación se centró en encontrar mecanismos y/o planes que permitieron lograr un objetivo concreto. Por consiguiente, el tipo de ámbito al que se aplica es muy específico y bien delimitado.

Según su profundidad: Explicativa

En esta modalidad investigativa no solo pretendió observar las variables, sino además se estudiaron las relaciones de influencia entre ellas para conocer su estructura y los factores que intervinieron en los fenómenos y su dinámica.

Según la Naturaleza de Datos: Cuantitativa

Se centró en el estudio y análisis de la realidad a través de diversos procedimientos basados en la medición. Esto porque permitió un mayor nivel de control e inferencia que otros tipos de investigación, siendo posible realizar experimentos y obtener explicaciones contrastadas a partir de hipótesis

Según su Manipulación de Variable: Cuasi Experimental

Se asemeja a la experimental en el hecho de que se manipularon una o varias variables concretas, con la diferencia de que no se pudo poseer un control total sobre todas las variables.

2.2. Materiales, Instrumentos y Métodos

2.2.1. Materiales:

Los materiales requeridos para el desarrollo del presente trabajo de investigación fueron los siguientes:

- Material bibliográfico, literatura relacionada a la confiabilidad de los equipos y la gestión del mantenimiento industrial en general.
- Computadora personal portátil con softwares apropiados para el procesamiento de datos numéricos.
- Papel, lapiceros, cuadernos de apuntes y otros artículos de escritorio para la redacción del informe final
- CD's, USB, para al almacenamiento de la información de forma electrónica
- Engrapador, perforador, Folder.
- Impresora, tonner.

2.2.2. Instrumentos

La Tabla 1, muestra las técnicas e instrumentos que fueron requeridos para la recopilación de la información necesaria para el presente trabajo de investigación cada una asociada a los indicadores propuestos de cada uno de los objetivos específicos.

La técnica más usada fue el de análisis de base de datos y su posterior interpretación, esto debido a que la mayoría de los datos que se analizaron se encontraron en bases históricas almacenados en los diferentes sistemas que maneja el proceso de mantenimiento del área de servicios de la empresa minera.

Para el caso de la confiabilidad, se tuvo que revisar la información de las paradas de los tableros de control eléctrico almacenada diariamente en el sistema en archivos en Excel que es administrado y actualizado por el área mantenimiento en función del registro de las atenciones mecánicas, asignándose el tipo de parada de los equipos, posteriormente se realizó el cálculo de disponibilidad en función de las horas operativas del equipo.

Del mismo modo sucede con el costo total del área de mantenimiento, información que es registrada en el sistema AMT por el área de planeamiento y estrategia en función de los costos asociados a cada orden de trabajo de los componentes que son administrados por el área de mantenimiento.

Se indican además las fuentes de información bibliográfica de donde son obtenidos los datos para cada instrumento utilizado, tanto interno del área de mantenimiento, así como fuentes externas referidos a libros y publicaciones de fuentes reconocidas y confiables.

Tabla 1: Matriz de Técnicas e Instrumentos

Matriz de Técnicas e Instrumentos				
Objetivo Específico	Indicador	Técnica	Instrumento	Fuente Bibliográfica de la Técnica
1.- Realizar un diagnóstico de la Gestión actual de Mantenimiento del área de servicios relacionados a los tableros de control eléctrico.	- Costos Totales de Mantenimiento = CAPEX + OPEX	Observación de datos	Maqueta de registro de datos de costos	Tipos de Costos de Mantenimiento (Campo, 2016)
	- Disponibilidad de Tableros de control eléctrico (%) Do = (Horas de Operación efectivas) / (Horas de operación presupuestadas)	Observación de datos	Maqueta de registro de datos de tiempo de parada de los equipos	Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento (Arata, 2017)
2.- Analizar la confiabilidad de los tableros de control eléctrico y su impacto en los sistemas de bombeo del área de servicios de una empresa minera	Confiabilidad (R) = 1-P(F)	Análisis e interpretación de oportunidades de mejora	Literatura relacionada a las mejores prácticas estrategias de mantenimiento	Practical reliability Engineering Fifth Edition (O'connor & Kleyner, 2013)
3.- Establecer el plan de mejora para la gestión de mantenimiento del área de servicios relacionados a los tableros de control eléctrico	Cantidad de Planes propuestos (Q)	Análisis e interpretación de oportunidades de mejora	Literatura relacionada a las mejores prácticas estrategias de mantenimiento	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCMII (Moubray, 2006)

Fuente: Elaboración propia

La tabla 2, nos permitió verificar si contamos con los medios necesarios para recopilar los datos y poder procesarlos posteriormente para el análisis y la propuesta del plan de mejora de gestión de mantenimiento del área de servicios en una empresa minera, soportados además por el personal administrativo en la interpretación de los datos.

Tabla 2: Lista de Verificación de Técnicas e Instrumentos

Lista de Verificación de Técnicas e Instrumentos		
Preguntas Generales	Si / No	Acciones a Tomar
¿Se cuenta con la información relacionada a los gastos operativos anuales del área de servicios de la empresa minera?	Si	
¿La información para el cálculo de la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas de bombeo y de los tableros de control eléctrico se encuentra ordenada para el cálculo directo?	No	La información recuperada de los registros en Excel solamente indica las horas de parada de los equipos, por lo que para el cálculo del indicador de la disponibilidad y confiabilidad será necesario procesar la información para mostrar los resultados.
¿La información que se encuentra en los registros es significativa y útil para el desarrollo del trabajo?	Si	
¿Se tiene acceso directo a la información necesaria para el desarrollo del proyecto de investigación?	Si	

Fuente: Elaboración propia

2.2.3. Métodos

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se utilizaron dos métodos específicos:

A. Diseño de planes de mantenimiento mediante el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) es una técnica para elaborar un plan de mantenimiento. Pero en realidad, el plan de mantenimiento no es más que uno de los productos del profundo análisis que debe efectuarse en la instalación o un contexto operativo. Además del plan de mantenimiento, se obtienen otra serie de conclusiones:

- Las modificaciones que es necesario llevar a cabo en la instalación, asumiendo que un buen mantenimiento no soluciona un mal diseño, y por tanto, si la causa raíz de un posible fallo reside en el diseño es esto lo que hay cambiar.
- Una serie de procedimientos de operación y mantenimiento que evitan que se produzcan las fallas analizadas.
- Una serie de medidas a adoptar para que, en caso de falla, las consecuencias se minimicen.
- Una lista de repuestos que es necesario mantener en stock en la instalación, no para evitar las fallas, sino para minimizar el tiempo de parada de ésta y por tanto para minimizar las consecuencias.

El objetivo fundamental de la implantación de un Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o RCM en una planta industrial es aumentar la confiabilidad de la instalación, es decir, disminuir el tiempo de parada de planta por averías

imprevistas que impidan cumplir con los planes de producción. Los objetivos secundarios, pero igualmente importantes son aumentar la disponibilidad, es decir, la proporción del tiempo que los equipos están en disposición de producir, y disminuir al mismo tiempo los costos de mantenimiento (Renovetec, 2016).

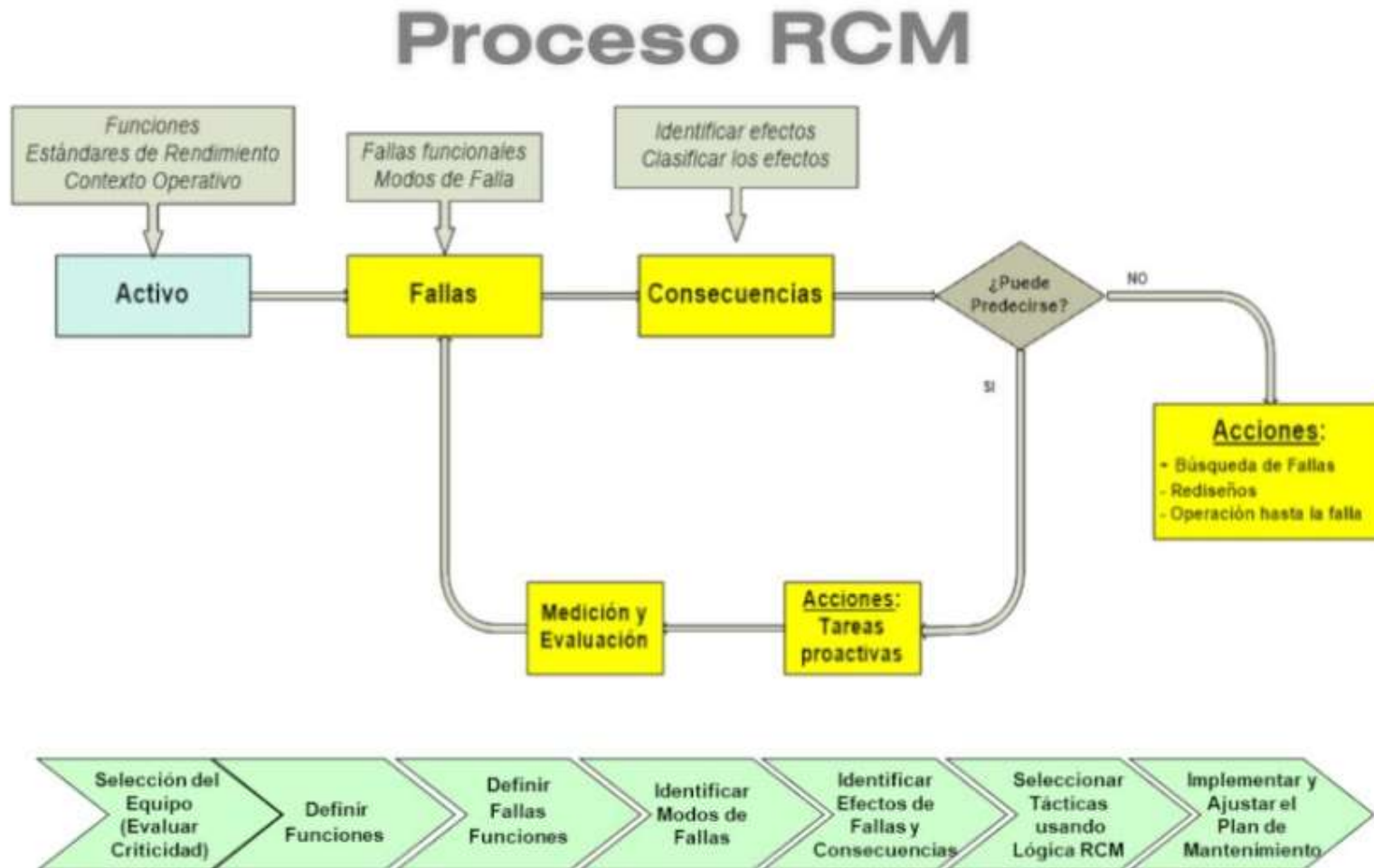
La Figura 1, muestra el proceso de los pasos necesarios para realizar un análisis de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en el cual se detallan de manera secuencial las actividades necesarias como: (1) Identificar el equipo y/o activo crítico, (2) Definir las funciones que tiene que cumplir cada uno de los equipos, (3) Reconocer los modos de fallas comunes, sus consecuencias y las acciones proactivas para minimizar dichas consecuencias que podrían ser operativas e impacto en seguridad y/o medio ambiente (Campos, Tolentino, Toledo, & Tolentino, 2019)

Los siete pasos principales para realizar un análisis RCM son descritos de la siguiente manera:

A.1.- Desarrollar objetivos Operacionales

Antes de aplicar un proceso determinado, se tiene que asegurar que cualquier equipo cumpla con las especificaciones de diseño por lo que se tiene que determinar lo que los usuarios quieren que hagan los equipos, en este caso los tableros de control eléctrico y asegurar que estos equipos tengan la capacidad de hacer dichos requerimientos, dicho con un ejemplo si el usuario desea que una bomba suministre un flujo de 100 l/min, dicha bomba debe tener esa capacidad, caso contrario no podrá cumplir con el requerimiento solicitado por el usuario.

Figura 1: Diagrama de Flujo para realizar el proceso RCM



Fuente: <https://angelmendizabal.com/mantenimiento/7-pasos-para-realizar-el-analisis-rcm/>

A.2.- Identificar funciones

Se tiene que definir las funciones de cada equipo en su contexto operativo, junto con las normas de rendimiento deseadas, para ello se conocen dos tipos de funciones:

Funciones Primarias: Define porqué el equipo fue adquirido en primer lugar. Esta categoría de funciones cubre aspectos tales como: velocidad, rendimiento, capacidad de almacenamiento o traslado, calidad del producto y servicio del cliente.

Funciones Secundarias: Identifica que más se espera que haga cada equipo, más allá de cumplir con las funciones primarias. Los usuarios también tienen expectativas en áreas como seguridad, control, contención, confort, integridad estructural, protección, eficacia de funcionamiento, cumplimiento con las regulaciones medioambientales y hasta la apariencia del equipo y/o activo.

Los usuarios de los activos están en la mejor posición de saber exactamente qué contribución hace cada equipo al bienestar físico y financiero de la organización en su conjunto, por lo que es importante que se encuentren inmersos durante el presente trabajo de investigación desde el principio.

A.3.- Identificar fallas funcionales

Se deben definir las fallas que puedan ocurrir durante la operación normal de los equipos para de esta manera tomar las acciones respectivas haciendo cumplir las funciones y expectativas del rendimiento del equipo. Para ello se deben listar las circunstancias que hacen que se llegue a un estado de falla e identificando qué eventos pueden causar que generen un estado de falla.

Los estados de falla son conocidos como fallas funcionales porque ocurren cuando el equipo es incapaz de cumplir una función a un estándar de

rendimiento que es aceptable por el usuario. Además de una total incapacidad para funcionar, el equipo podría seguir funcionando, pero a un nivel inaceptable de rendimiento, es decir que no cumple con las funciones secundarias.

A.4.- Determinar modos de falla y efectos

Modo de Falla: Una vez que se ha identificado cada una de las fallas funcionales, el siguiente paso es el de identificar todos los eventos que son bastante probable que causen cada uno de los estados de falla, éstos son conocidos como “modos de falla”.

Los modos de falla incluyen aquellos que han ocurrido en el mismo equipo o de similares características o que opera en el mismo contexto, fallas que actualmente son prevenidas por regímenes de mantenimiento existentes y fallas que no se han producido aún pero que se considera que son posibles de ocurrir.

La mayoría de listas tradicionales incluyen modos de falla causadas por el deterioro o por el desgaste normal, sin embargo, la lista debe incluir fallas causadas por errores humanos (operadores y mantenedores) y falla de diseño, de modo que todas las causas de falla bastante probables del equipo pueden identificarse y pueden repartirse apropiadamente.

También es importante identificar la causa de cada falla con bastante detalle para asegurar que el tiempo y esfuerzo no se pierda tratando los síntomas en lugar de las causas.

Efectos de Falla: El proceso RCM vincula una lista de los efectos de las fallas que describen lo que pasa cuando ocurre cada modo de falla. Estas

descripciones deben incluir toda la información necesaria para apoyar la evaluación de las consecuencias de la falla, tales como:

- ¿Qué evidencia hay de que la falla ha ocurrido?
- ¿De qué manera representa una amenaza a la seguridad o al medio ambiente?
- ¿De qué manera afecta la producción o la operación?
- ¿Qué daño físico es causado por la falla?
- ¿Qué debe hacerse para reparar la falla?

A.5.- Identificar equipos y sistemas con historial de poca confiabilidad

Antes de iniciar el análisis para los requisitos de mantenimiento de los equipos en cualquier organización, necesitamos saber el nivel de criticidad de estos equipos para decidir cuáles de ellos estarán sujetos al proceso de revisión RCM. Esto significa que debe prepararse un registro histórico de las paradas y sus causas para poder categorizarlas. Actualmente la gran mayoría de las organizaciones cuenta con un registro histórico de los equipos que son adecuados para este propósito por lo que la tarea se hace más sencilla.

A.6.- Desarrollar recomendaciones de tareas

Una vez aplicado correctamente los pasos anteriores, se podrán identificar mejoras notables en la efectividad del mantenimiento siendo de implementación rápida. Sin embargo, la aplicación exitosa del RCM depende de la planificación y preparación meticulosa. Los elementos importantes del proceso de la planificación son:

- Decidir qué equipos probablemente se beneficiarán del proceso RCM y en ese caso, de qué manera serán beneficiados.

- Evaluar las fuentes exigidas para aplicar el proceso a los equipos seleccionados.
- En el caso donde los beneficios probables justifiquen la inversión, decida en detalle quién la realizará y quién auditará cada análisis, cuándo y dónde, así mismo, realizar una serie de entrenamientos apropiados para su entendimiento y aplicación.
- Asegurar que se entienda claramente el contexto operativo de los equipos que estén inmersos en el proceso RCM.

A.7.- Identificar “Problemas de confiabilidad” y oportunidades de mejora

Las recomendaciones son llevadas a cabo incorporando tareas de mantenimiento en el sistema de planificación y control de mantenimiento, incorporando cambios en los procedimientos estándares de operación del recurso y dando recomendaciones para los cambios de diseño a la autoridad apropiada.

El RCM rinde resultados bastante rápidos, de hecho, si se enfocan y se aplican correctamente, las revisiones del RCM pueden pagarse por sí mismas en cuestión de meses. Las revisiones transforman los requisitos de mantenimiento percibidos en los equipos usados por la organización y la manera en las que la función de mantenimiento se percibe en su conjunto teniendo como resultado un mantenimiento más rentable, armonioso y mucho más exitoso.

B. Método Analítico

Otro de los métodos utilizados como parte del presente trabajo de investigación fue la aplicación del método analítico, el cual se centra principalmente

descomponer un objeto de estudio separando cada una de sus partes para estudiarlas de manera individual (Lopera, Ramirez, Zuluaga, & Ortiz, 2016)

Como parte de este método se pudo realizar la identificación del sistema crítico que afecta el sistema de bombeo tanto en costo como en disponibilidad operativa y en confiabilidad integral.

Luego de haber identificado el sistema crítico fue necesario identificar los equipos críticos que presentaban también altos gastos de operación y baja confiabilidad donde se pudo identificar los equipos a los cuales se les debe aplicar la el proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, método descrito en la parte superior, y el componente específico dentro del sistema. De esta manera la mejora de la Gestión de Mantenimiento es mucho obtiene resultados favorables para el área de servicios de una empresa minera en términos de ahorro en costos y aumento de la confiabilidad.

La aplicación de este método nos permitió ir identificando progresivamente tanto los sistemas como los equipos que tienen mayor impacto en los indicadores claves que son parte del presente estudio de investigación.

El método analítico en conjunto con el desarrollo del método del mantenimiento centrado en la confiabilidad nos permitió identificar de manera consistente y prioritaria el tipo de estrategia de mantenimiento y los equipos específicos donde tienen que implementarse, el cual forma parte integral de un proceso de análisis en busca de la mejora continua dentro de la gestión de mantenimiento.

2.3. Procedimiento

Para realizar el proceso de análisis de los datos se procedió a revisar la data histórica de los años 2018 y 2019, durante la recolección de la información y para calcular los costos operativos de los equipos que son administrados por el área de servicios, se tuvo que analizar la información almacenada en las órdenes de trabajo durante el año 2017, estos datos fueron extraídos del ERP – SAP, del módulo IW32 específicamente. La información almacenada en las órdenes de trabajo permite categorizar además de los componentes que forman parte de los sistemas de bombeo, los sistemas y subsistemas a la que se han realizado las actividades de mantenimiento, incluso es posible categorizar e identificar los equipos que presentan mayores gastos operativos cargados para el año en evaluación.

Durante el proceso del análisis de la información, se procedió a analizar el comportamiento de la confiabilidad durante el mismo periodo (2018 y 2019), esto con la finalidad de determinar si dichos resultados cumplieron con lo deseado por el área de servicios de la empresa minera.

Los datos fueron recopilados de registros históricos de paradas administrados por un controlador de paradas de los equipos en estudio y cuyo detalle fueron almacenados en archivos Excel, el controlador de paradas, denominado Dispatch es un mecanismo de administración de producción por parte del área de mantenimiento donde se registran las horas de parada de los equipos, así como las causas más probables de las paradas o los denominados modos de fallas.

Para realizar el cálculo de la confiabilidad se tuvo que analizar los tiempos de operación y los intervalos de paradas de cada uno de los equipos dependiendo del mes de trabajo consolidando al final para todos los componentes los resultados totales de operación, se realiza posteriormente la identificación del tipo de distribución de los

datos de los tiempos promedios de parada adecuando mediante técnicas probabilísticas el cálculo de la confiabilidad de acuerdo al tiempo de funcionamiento.

La presentación de la información se realizó mediante un gráfico de tendencia donde se compararon la confiabilidad real y la confiabilidad esperada de manera mensual.

Otra de las ventajas de haber realizado el análisis de las paradas de los equipos fue el de identificar aquellos sistemas que tuvieron mayor cantidad de tiempo de paradas, esta información analizada con los sistemas que tuvieron mayores gastos operativos permitió identificar el sistema crítico. Para lograr esto se tuvo que homogenizar las categorías de los sistemas del reporte de paradas con la información de las órdenes de trabajo y los registros del dispatch.

Una de las herramientas determinantes para poder realizar el análisis del presente trabajo fue el uso de la matriz de prioridad donde se cruzó la información de los gastos operativos versus las paradas con mayor impacto de los equipos analizados de esta manera la matriz permitió combinar los dos factores de evaluación siendo posible identificar con certeza el sistema crítico.

Luego de la identificación de los equipos críticos, se procedió a aplicar la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad aplicando para ellos los pasos descritos en la metodología, donde resalta la identificación de los modos de falla típicos en los tableros de control eléctrico y sus efectos y consecuencias. Posterior a ello se definen las estrategias de mantenimiento de acuerdo al árbol de decisión RCM.

Reuniendo toda la información analizada, es posible diseñar el Plan de Mejora de la Gestión de Mantenimiento del área de servicios, enfocado en los tableros de control eléctrico.

El análisis financiero viene a ser un elemento importante para viabilizar la propuesta de desarrollo del presente estudio de investigación, para ello se realizó el cálculo del WACC para poder tener una referencia del valor mínimo de rentabilidad deseada, posteriormente se calculó mediante plantillas en Excel el cálculo del Valor Actual Neto y la tasa interna de retorno (VAN, TIR) en un periodo de tiempo de 10 años, tiempo que es el recomendado para el uso de estos equipos de gran minería

Para ello se aplicó la siguiente fórmula:

Ecuación 1: Fórmula para calcular el WACC

$$WAAC = Kdt \times \left(\frac{D}{D + P} \right) + Ke \times \left(\frac{P}{D + P} \right) \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

WAAC: Costo promedio ponderado de capital

Kdt: Costo de la deuda después de impuestos

Ke: Costo del patrimonio

D: Valor o proporción de la deuda

P: Valor o proporción del patrimonio

2.4. Operacionalización de Variables

Tabla 3: Tabla de operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Dependiente:			
Confiabilidad de los tableros de control eléctrico	Probabilidad de que un equipo o sistema operar sin fallar por un determinado periodo de tiempo bajo condiciones de operación establecidas por el usuario (Carlos Perez, 2015)	Probabilidad de que no falle en 200 días de funcionamiento	Confiabilidad = $1 - P(F)$
		Tiempo Promedio entre Fallas (MTBF) evaluado en un mes de operación	MTBF (Hrs / Paradas) = (Total Horas de operación / N° Paradas)
Independiente			
Mejora de la gestión de mantenimiento del área de servicios	Conjunto de propuestas que permiten mejorar el proceso de planificación y programación de las actividades de mantenimiento enfocados principalmente en los recursos utilizados con la finalidad de realizar reparaciones en el menor tiempo posible asegurando la calidad del mismo (Santiago García, 2010)	X1: Nivel Trabajos programados	= (Total de Trabajos Programados) / (Total de Trabajos realizados) x 100%
		X2: Porcentaje de trabajos realizados en tableros eléctricos respecto al total	= (Trabajos de Tableros eléctricos) / (Total de trabajos realizados) x 100%
		X3: Cumplimiento de trabajos programados	= (Total trabajos programados realizados) / (Total de trabajos programados) x 100%
		X4: Nivel de cumplimiento de presupuesto	= (Costos totales reales) / (Costos totales presupuestados) x 100%

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3 muestra las dimensiones de las variables dependiente e independiente, de acuerdo a ello se definen los principales indicadores para poder evaluar de manera cuantitativa el estado actual del proceso de gestión de mantenimiento y considerarlos como punto de referencia inicial para evaluar el desempeño positivo o negativo de la gestión de mantenimiento del área de servicios y de la confiabilidad de los tableros de control eléctrico.

Variable Dependiente: La confiabilidad

La confiabilidad viene a ser la probabilidad de que un equipo y/o componente pueda trabajar durante un determinado periodo de tiempo sin fallar bajo condiciones establecidas por el usuario (O'connor, 2016), para el caso del presente trabajo de investigación, este periodo será de 200 días de funcionamiento deseado.

Esta variable permite conocer el desempeño actual de los tableros eléctricos donde al mejorar la gestión de mantenimiento se deberá obtener valores mayores (medido de 0 a 100%)

Variable Independiente: Gestión de mantenimiento del área de servicios

La gestión de mantenimiento viene a ser el conjunto de actividades sistematizadas y organizadas que tienen la finalidad de mantener las variables operativas con las que fueron diseñadas cada uno de los componentes que son gestionados por el área respectiva de una empresa u organización. Durante el proceso de administración de los equipos, es necesario que se implementen metodologías de trabajos, análisis de información, administración logística de repuestos o componentes, capacitación del personal técnico y administrativo y la búsqueda de mejores prácticas organizacionales para mantener los objetivos por encima de lo esperado.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1 Diagnóstico actual de la gestión de mantenimiento preventivo del área de servicios

3.1.1 Mapa de procesos de la gestión de mantenimiento del área de servicios

La figura 2, muestra el mapa de proceso de la gestión de mantenimiento del área de servicios el cual tiene la finalidad de identificar a los principales responsables para la atención oportuna de los equipos que son administrados por el área de mantenimiento. En este caso en particular, se está levantando el proceso del mantenimiento preventivo donde se comienza por el área de planeamiento de mantenimiento donde debe verificar la información de las órdenes de trabajos registrados en los sistemas ERP de la empresa tales como son SAP y AMT. Estas bases de datos permiten identificar los trabajos que están pendientes de ejecución para cada tipo de equipo del área de servicios los cuales pueden tener varias fuentes de ingreso tales como: el área de inspecciones periódicas, el área de ejecución si identifica algún repuesto con desgaste, el área de confiabilidad quienes se encargan del monitoreo de las condiciones operativas de los equipos así como, la identificación de los principales modos de falla de los componentes a nivel de flotas o secciones de bombeo y tareas que son rutinarias y cargadas en el sistema como parte de las recomendaciones de los proveedores o representantes de las marcas de los equipos como parte del cuidado y extensión de las horas de vida útil de cada uno de los componentes. Toda esta información es registrada en los sistemas ERP mediante órdenes de trabajo los cuales tienen información del tipo de trabajo a realizar, tiempo requerido, cantidad y especialidad del personal técnico, repuestos necesarios para ejecutar la tarea y los costos asociados para cada actividad.

Figura 2: Mapa de Procesos de Mantenimiento del área de servicios



Fuente: Elaboración propia

El área de planeamiento de mantenimiento es el encargado de asegurarse que se encuentren disponibles todos los recursos necesarios para ejecutar la tarea de mantenimiento descritos en la parte superior, a este sub proceso se le denomina “Planificación”, luego de contar con todos los recursos disponibles debe coordinar la fecha y hora para ejecutar la tarea, a este sub proceso se le denomina “Programación” comunicando de manera oportuna y efectiva a todos los involucrados y en especial al área operativa el detalle de los trabajos que se van a realizar así como la fecha y tiempo de intervención.

El programa es comunicado al área de ejecución de mantenimiento quienes verificarán que efectivamente están disponibles todos los recursos necesarios y comunicando también al área de operaciones que los equipos o sistemas de bombeo serán intervenidos.

El área de operaciones es el encargado de atender los equipos de producción en función de criterios tales como: necesidad operativa de los equipos, criticidad de producción, disponibilidad de operadores para realizar maniobras a los equipos. Una vez aceptada la intervención de los equipos, el área de ejecución procederá de manera ordenada, secuenciada y manteniendo los estándares de seguridad y cuidado del medio ambiente la reparación programada con calidad, eficiencia y cumpliendo con los tiempos estimados por el área de planeamiento.

Luego de culminado la actividad de mantenimiento, se procederá a realizar el correcto llenado de las órdenes de trabajo donde se actualizará información tales como: descripción de los trabajos realizados, tiempo real de ejecución del trabajo y repuestos adicionales utilizados. Toda esta información será registrada en el sistema ERP siendo parte de la base histórica de información relacionada a los equipos administrados por el área de mantenimiento.

Durante el proceso de ejecución de las actividades de mantenimiento, es posible que se encuentren observaciones o anomalías de los componentes internos de cada uno de los equipos intervenidos, donde dependiendo de la severidad y el tiempo para ejecutar el correctivo, se decidirá si se genera un backlog o se atiende inmediatamente para corregir el problema; en ambos casos esta “observación” será registrado en el sistema ERP para que quede almacenado en el sistema.

Toda la información almacenada en el sistema, es revisada y analizada de manera permanente por el área de confiabilidad de mantenimiento, quienes tienen la función de identificar los modos de falla más comunes que afectan a nivel de flota o sistemas a los equipos tales como: desgaste de elementos, pérdida de presión o caudal, alto consumo de energía, fallas recurrentes de los equipos, altos niveles de contaminación debido a problemas de aplicación de los equipos, entre otros. En función a ello y en coordinación con los proveedores o representantes de marca definirán la actividad correctiva para minimizar los daños a los equipos, logrando con ello el incremento de la confiabilidad de los componentes.

Otra de las funciones del área de confiabilidad es el de realizar el seguimiento de las variables operativas de los equipos con la finalidad de advertir problemas de fallas funcionales, generando órdenes de trabajo en el sistema para corregir dichos problemas.

Se realiza también el cálculo de los principales indicadores de mantenimiento tales como: disponibilidad, tiempos promedios para reparación y tiempos promedios entre fallas, los cuales permiten medir el nivel de gestión del mantenimiento en el área de servicios.

3.1.2 Proceso y funcionamiento de los equipos que pertenecen al área de servicios

3.1.2.1 Conceptos del área de mantenimiento de servicios

Bomba Centrífuga

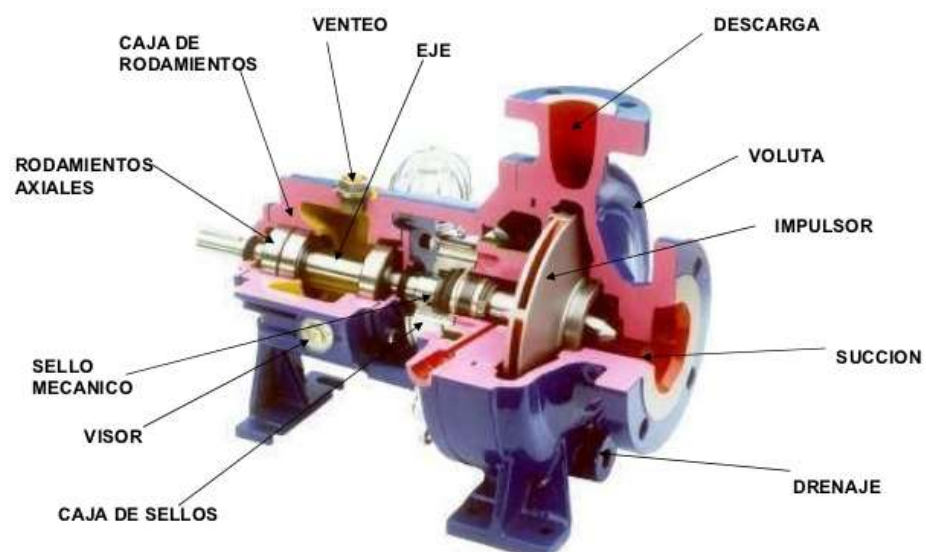
Según, De las Heras (2011, p.121). Una bomba viene a ser una máquina de fluido que intercambia energía con el fluido que está contenido o que circula a través de ella; el cual tiene la misión de transferir energía a un líquido para permitir su transporte en una instalación, esto conlleva normalmente a un aumento de presión en la salida de la bomba que puede relacionarse con el caudal que se está transportando en forma de curva característica.

Las bombas centrífugas utilizan un impulsor giratorio para mover el agua en la bomba y presurizar el flujo de descarga. Pueden procesar todo tipo de líquidos, incluso de baja viscosidad.

Los componentes principales de una bomba constan de:

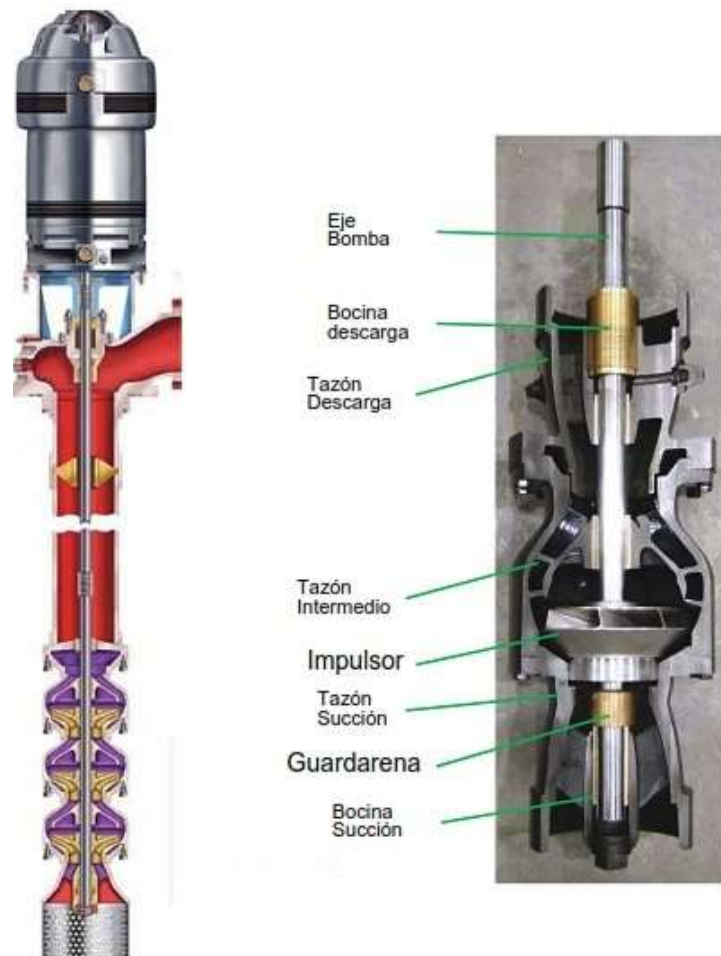
- Carcasa: Cuerpo que recubre el mecanismo de avance del agua.
- Entrada y Salida: Conductos por donde circula el agua.
- Impulsor, Rotor o Volutas: Elementos utilizados para impulsar el agua.
- Sellos, Retenes y Anillos: Elementos que permiten el correcto sellado para evitar fugas externas.
- Eje Impulsor: Elemento que sostiene el impulsor para que gire sobre éste.
- Cojinetes o Rodamientos: Elementos que sostienen el eje del impulsor.

Figura 3: Partes principales de una bomba centrífuga – Horizontal



Fuente: Manual de Partes del Catálogo de Bombas Goulds

Figura 4: Partes principales de una bomba centrífuga - Vertical



Fuente: Manual de Partes del Catálogo de Bombas Hydroflo

Motor Eléctrico

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas. Pueden ser de corriente alterna (AC) y de corriente continua (CC) y se basan en el mismo principio de funcionamiento, el cual establece que, si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo electromagnético.

Dentro de los motores de corriente alterna (CA) existen dos tipos de motores:

- *Los Síncronos:* Es un alternador trifásico que funciona a la inversa, donde los imanes se montan sobre un rotor y se excitan mediante corriente continua, las bobinas de la armadura están divididas en tres partes alimentadas con corriente trifásica.
- *Los Asíncronos:* Son los más utilizados en la actualidad (>80%), conocidos también como motores de inducción se caracteriza por el hecho de que no existe corriente inducida a uno de sus devanados (normalmente el rotor) donde la corriente que circula por el devanado del rotor se debe a la fuerza electromotriz inducida en él por el campo giratorio. Su nombre obedece a que la velocidad de giro del motor no es impuesta por la frecuencia de la red. Normalmente trabajan a velocidad constante, sin embargo, gracias a los tableros eléctricos de frecuencia variable se pueden utilizar a diversas velocidades (RPM's). Como ventajas se tiene una construcción simple, bajo peso, mínimo volumen, bajo costo y mantenimiento inferior en comparación con cualquier otro tipo de motor eléctrico.

Hay dos tipos básicos de este tipo de motores: Los de jaula de ardilla, donde el devanado del rotor está formado por barras de cobre o aluminios y los extremos están puestos en cortocircuito; y los de Rotor bobinado, donde el devanado del rotor está formado por un bobinado trifásico similar al estator con igual número de polos.

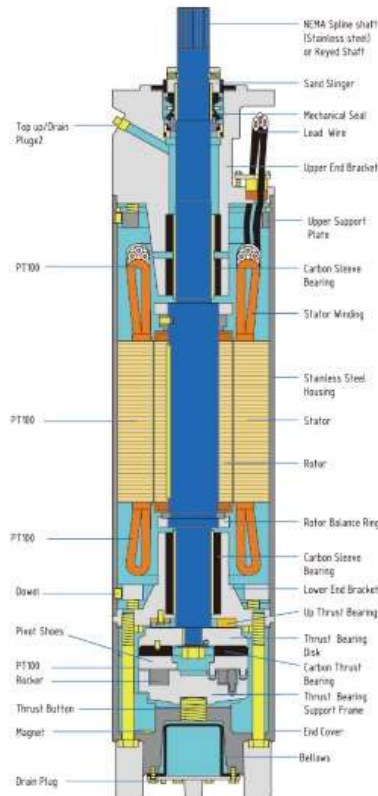
De la misma manera que las bombas mencionadas en la parte superior, los motores eléctricos también de acuerdo a su aplicación pueden los utilizados al aire libre (vertical u Horizontal) y los sumergibles (Normalmente verticales) utilizados en pozos profundos.

Figura 5: Modelos de Motores eléctricos utilizados al aire libre



Fuente: Catálogo de Motores eléctricos Baldor

Figura 6: Modelos de Motores eléctricos sumergibles en agua

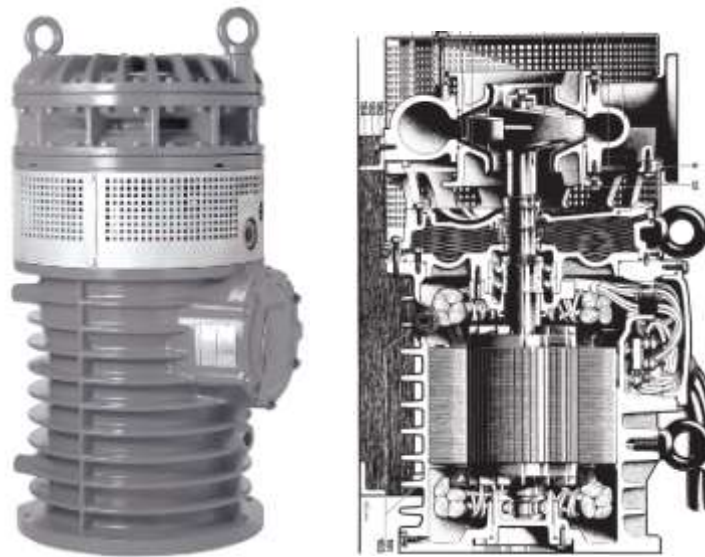


Fuente: Catálogo de Motores eléctricos SME 10

Electrobomba

Una electrobomba viene a ser el conjunto de un motor eléctrico y una bomba centrífuga adaptadas dentro de una misma carcasa formando de esta manera un solo bloque o conjunto que permite reducir sus dimensiones totales aumentando sus prestaciones de operación y aplicación para la misma potencia consumida.

Figura 7: Detalle de partes de una electrobomba Flygt 2400.402



Fuente: Catálogo de Electrobombas Flygt

La electrobomba de la Figura 7, es de la Marca Flygt, modelo 2400.402 una de las más utilizadas dentro de la operación minera debido a que es sumergible y robusta, así como que permite trabajar en condiciones de alta concentración de sólidos de hasta un 10% y abrasivos. Está fabricado con piezas de desgaste revestidas con poliuretano, así como con partes de acero inoxidable para trabajar con líquidos de alta acidez ($\text{pH} = 3.2$) principalmente el impulsor y las piezas de la sección hidráulica.

Este tipo de bomba utiliza un motor de corriente alterna, trifásica con un rotor en corto circuito con clase de aislamiento “F”, una potencia de 140 HP y una velocidad de 3570 RPM.

Posee dos impulsores radiales acoplados en serie y unos protectores de temperatura del motor denominados RTD's que permiten advertir problemas de funcionamiento del equipo.

Tablero de Control Eléctrico

Los tableros de control eléctrico son aquellos paneles donde se encuentran los dispositivos de seguridad y los mecanismos de control de una instalación eléctrica. Debido a que los motores manejan grandes potencias, se hace necesario contar con un mecanismo de protección y supervisión que permitan controlar y monitorear variables de operación como: Consumo de corriente, corrientes parásitas, estabilidad frecuencias, rampas de arranque y apagado de los motores entre otros. De la misma manera permite proteger el motor eléctrico si se producen problemas dentro del contexto operativo como son: Elevación de temperatura de operación, sobre corrientes y arranques muy frecuentes que podrían quemar las bobinas del motor eléctrico.

Existen dos tipos principales de tableros eléctricos: Los que tienen variador de frecuencia y los que no tienen variador de frecuencia o soft-starter.

La diferencia entre ambos es que el primero permite trabajar en un rango variable de frecuencia y por ende de las RPM's del motor lo que facilita la actividad operativa donde en algunos casos se requiere disminuir el caudal de la bomba y en otros obtener la máxima potencia suministrada. El otro modelo sólo trabaja en una frecuencia establecida por la red que es de 60 Hertz. Si bien es cierto que permite un arranque suave mediante el control de la corriente de entrada, su desventaja radica en que las condiciones de operación deben ser estables permitiendo que el motor trabaje a su máxima potencia y flujo de operación.

Figura 8: Detalle de partes Tablero de control Eléctrico



Fuente: Fotografía tomada en terreno de operación

Sensores de Protección – PT100

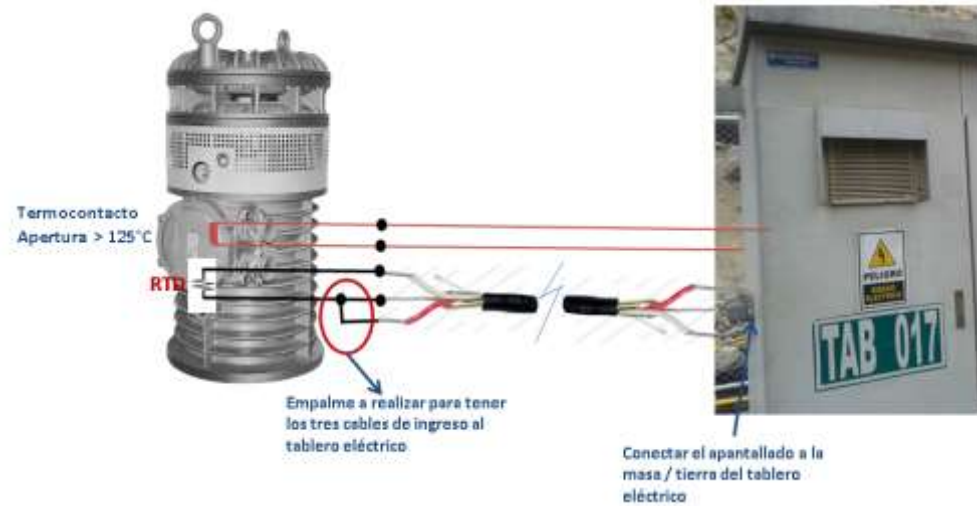
Este tipo de sensores permiten medir la temperatura de los componentes internos de los motores eléctricos, principalmente de los rodamientos y el devanado interno del motor. El principio de funcionamiento se basa en la variación de la impedancia de un conductor con respecto a su temperatura. Este tipo de variación no indica que el número de electrones en estado de conducción aumente o disminuya, sino que existirá una mayor vibración por parte de los iones del conductor, lo que implica una serie de choques entre los iones y los electrones impidiendo el flujo de estos últimos. Al ocurrir esto, se presentará una menor circulación de electrones en el conductor, aumentando su impedancia de manera proporcional a su temperatura. (Martinez, Rojas, & Tous, 2011).

Dependiendo de su forma constructiva existen diversos tipos de sensores entre las que destacan: Tipo bobinado, tipo laminado, tipo enroscado, y tipo de anillo hueco. Según el material utilizado pueden ser: Platino, Níquel y cobre.

Del mismo modo, es de vital importancia acondicionar la señal de ingreso y salida encontrándose en el mercado sensores RTD's de dos, tres y cuatro conductores siendo el más utilizado el de tres conductores.

La lectura de la señal de temperatura se realiza mediante un módulo electrónico TR400

Figura 9: Instalación de Sensor de Protección por Temperatura RTD



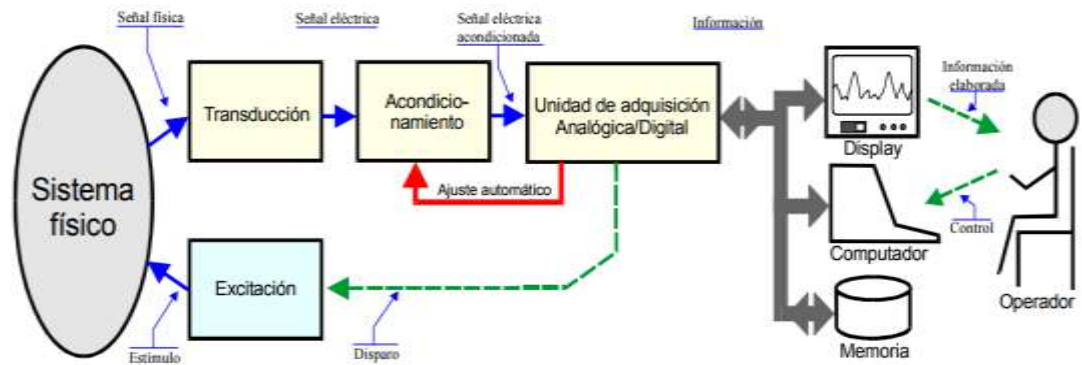
Fuente: Elaboración propia

Instrumentación, Telemetría y Transmisión de Datos

La telemetría incluye un conjunto de procedimientos para medir magnitudes físicas desde una posición distante al lugar donde se producen los fenómenos que queremos analizar abarcando, además el envío de la información hacia el operador del sistema. Procede del vocablo griego ‘tele’ que significa remoto y ‘metron’ que significa medida.

Un sistema de telemetría normalmente está constituido por un transductor como dispositivo de entrada, un medio de transmisión en forma de líneas de cable u ondas de radio, dispositivos de procesamiento de señales y dispositivos de grabación o visualización de datos.

Figura 10: Esquema básico de un sistema de instrumentación y telemetría



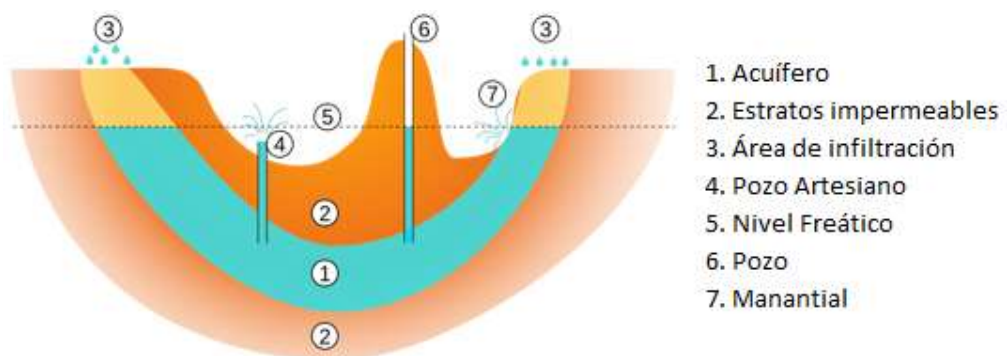
Fuente: Instrumentación electrónica de comunicaciones (2010, p.6)

Capa Freática

La capa freática viene a ser la acumulación de agua subterránea que se encuentra a una profundidad relativamente pequeña bajo el nivel del suelo. Prácticamente es un acuífero y son los más expuestos a la contaminación proveniente de la superficie. Suele estar limitada por dos superficies; la inferior suele ser un estrato de terreno impermeable a una profundidad más o menos grande. Por encima hay una zona saturada, que viene a ser la capa freática en sí, cuyo límite superior puede ser un estrato impermeable o no, siendo éste el límite llamado nivel freático.

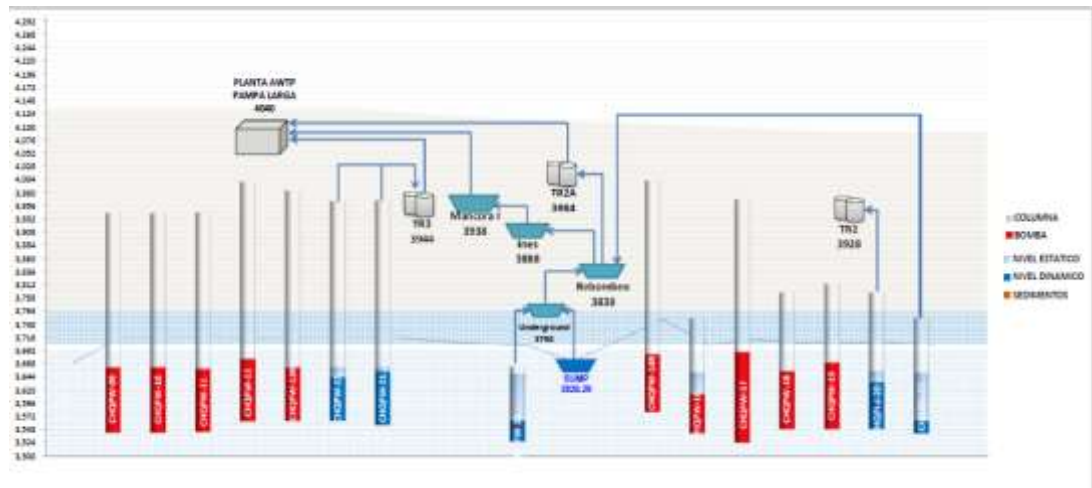
El plan de minado considera bajar el nivel de la capa freática conforme se vaya realizando el movimiento de tierra con maquinaria pesada, siendo importante evaluar cuál es el comportamiento o recuperación del agua subterránea.

Figura 11: Representación gráfica de la capa Freática



Fuente: Extraído de: <https://goo.gl/KzZLpH>

Figura 12: Capa Freática del tajo en Minería a tajo abierto



Fuente: Área de Planeamiento de Aguas del área de operaciones de la empresa minera

Parámetros de Operación de los Sistemas de Bombeo

Los siguientes parámetros de operación y funcionamiento son de vital importancia para poder gestionar adecuadamente la condición de los equipos que conforman cada sistema o unidad de bombeo de agua, en base a la recopilación, registro, análisis y seguimiento de estas variables será posible lograr los objetivos considerados en este proyecto de investigación que recaen principalmente en aumentar la confiabilidad y reducir los costos operativos de los equipos.

- **Horas de Funcionamiento:** Se calculan desde la fecha de instalación del componente hasta la fecha de evaluación o retiro del mismo, dependiendo de las formas de registro de este valor pueden ser automáticos y referenciales, para este trabajo se considerarán que los equipos trabajan 24 horas al día y se medirá el tiempo en días de operación debido a que no se cuenta con un registrador electrónico que mida exactamente las horas de operación.
- **Flujo Instantáneo:** Viene a ser el flujo bombeado por el equipo el cual dependerá de las condiciones de operación y de la curva característica del diseño de la bomba, para ello es de vital importancia

realizar un pre - comisionamiento al instalar el equipo, pues a partir de ello se podrá evaluar si existe algún deterioro progresivo que alerte de un problema en el equipo o si los problemas provienen de las condiciones de operación del equipo

- **Consumo de Corriente o Amperaje:** Este parámetro advierte de las condiciones de operación del motor eléctrico, el cual tiene un límite máximo de consumo dependiendo del modelo y potencia consumida por la bomba, un aumento o disminución del consumo de corriente nos advertirá de un problema en la operación del sistema bomba – motor que puede recaer sobre la pérdida de aislamiento o restricciones en la descarga del sistema.
- **Frecuencia de Trabajo:** Se refiere a la frecuencia de la señal eléctrica de la red o generador, normalmente es de valor de 60 Hz, sin embargo, varios de los sistemas de bombeo utilizan variadores de frecuencia por lo que su rango de operación varía entre 45 Hz y 60 Hz. Este parámetro es de vital importancia pues a partir de ello se pueden sacar conclusiones importantes acerca de la corriente consumida y el flujo del sistema por estar directamente relacionados.
- **Presión de Línea:** Viene a ser la presión generada por las restricciones que encuentra el fluido desde el punto de descarga hasta su destino final. Depende principalmente de la altura estática, diámetro de la tubería, accesorios instalados a lo largo de la línea como son válvulas de paso, check, flujómetros, codos, entre otros. Un aumento de presión en la línea será indicativo de que hay demasiada restricción en la descarga por lo que debería evaluarse con la finalidad de evitar daños en el sistema.
- **Nivel dinámico:** Viene a ser el nivel al cual se encuentra el espejo de agua, siendo un valor importante principalmente en equipos instalados en pozos profundos pues de este valor depende el cumplir con el NPSH (r) para evitar cavitación en la bomba y eventos de alta temperatura en el motor eléctrico.

- **Temperatura de Operación:** Es un parámetro que debe medirse con frecuencia para advertir de algunos problemas en el bobinado del motor eléctrico cuando haya problemas de refrigeración del sistema o en sus rodamientos cuando presenten problemas de lubricación. Los rangos de operación varían dependiendo de la aplicación de los equipos, por lo general se encuentran entre 45°C y 120°C ya sean en motores sumergibles o motores de operación atmosférica.

3.1.2.2 Manejo de aguas subterráneas y superficiales

La siguiente sección define y muestra las formas de construcción de las principales estructuras que son utilizadas dentro de los sistemas de drenaje subterráneo, manejo de aguas no tratadas y tratadas, así mismo se muestra referencialmente la forma en la que están instalados los sistemas de bombeo y las condiciones de operación a la que están expuestos.

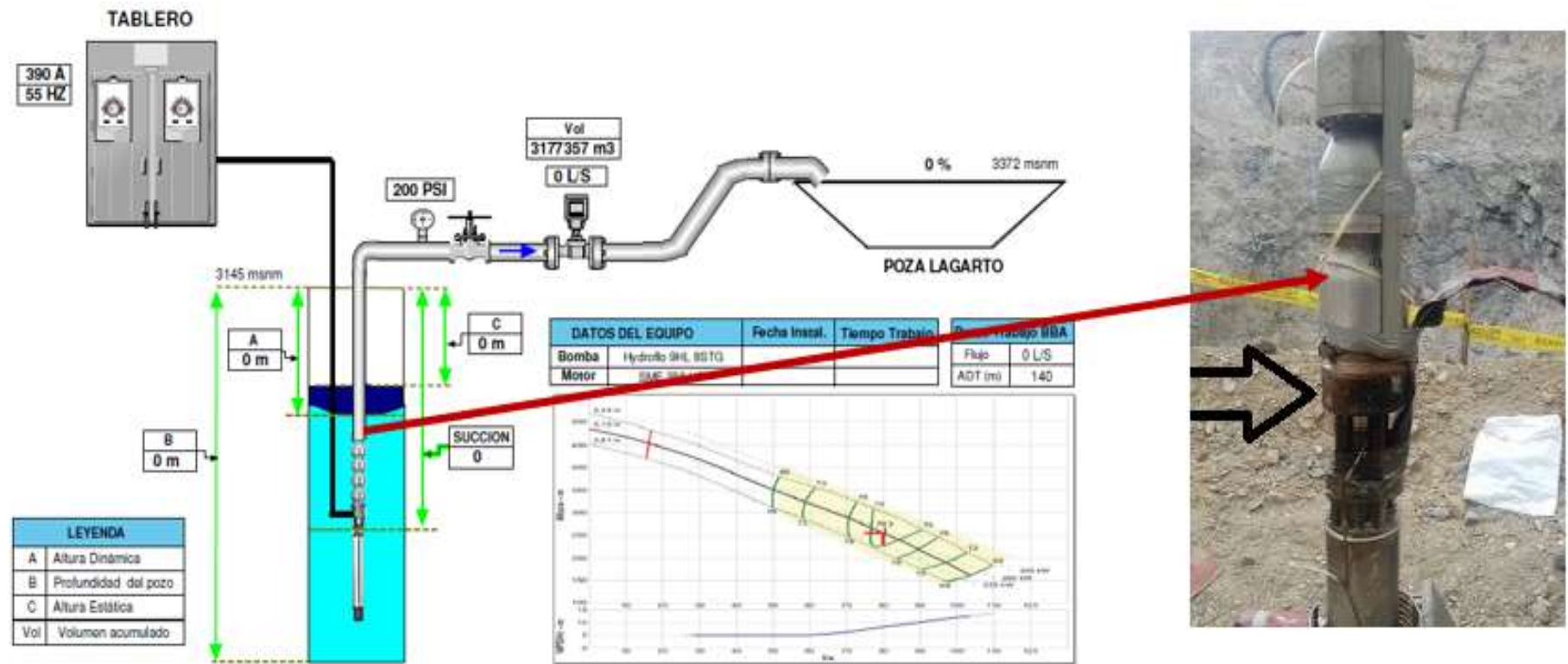
Pozos

Un pozo es una estructura que cuenta únicamente con un sistema de bombeo que consta de un motor eléctrico, una bomba y un tablero principalmente, adicionalmente el sistema cuenta con válvulas tipo mariposa, válvulas check, manómetros de presión, sensores de temperatura instalados del motor eléctrico hacia el tablero de control.

La función principal de un pozo es el de extraer el agua del subsuelo bajando de esta manera la capa freática permitiendo realizar el proceso de minado.

La cantidad de pozos instalados dependerá del plan de minado estimado para un determinado periodo de vida del tajo y de la hidrogeología del terreno explotado, de ser necesario se construyen nuevos pozos para permitir bajar más la capa freática. El cálculo de los indicadores se realiza en función a un solo sistema de bombeo (Bomba – Motor – Tablero)

Figura 13: Representación gráfica de un Pozo profundo



Fuente: Elaboración propia

Pozas

Las pozas están ubicadas en la parte intermedia del proceso de bombeo de las aguas subterráneas o superficiales. Son estructuras que cuentan, a comparación de los pozos, con más de un sistema de bombeo (Motor – Bomba – Tablero) y se utilizan tanto en el manejo de las aguas subterráneas, aguas no tratadas y aguas tratadas. Tienen la ventaja de poder ser construidas en cualquier ubicación disponible dentro de la mina, así como poder ser re-ubicadas conforme lo necesite la operación.

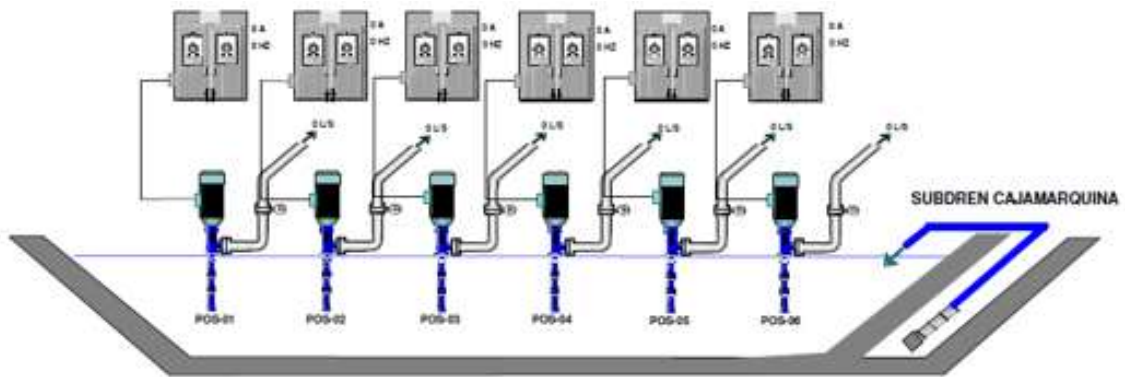
La desventaja de este tipo de estructuras es que almacena gran cantidad de sedimentos sólidos que pueden afectar el desempeño normal de la bomba por lo que es necesario contar con un plan de limpieza frecuente de estas estructuras, sin embargo, el proceso operativo hace algunas veces difícil realizar estas tareas de limpieza.

Para calcular los indicadores de operación se asume que cada sistema de bombeo es una unidad independiente debiendo realizar los cálculos debidamente para obtener los indicadores globales de cada estructura en función a las horas trabajadas, la cantidad de unidades de bombeo y las intervenciones realizadas en un horizonte de tiempo determinado.

No se consideran que las unidades de bombeo trabajan de manera paralela, debido a que el requerimiento de la operación es el de maximizar el flujo y no ser back up de un flujo determinado.

Las unidades de bombeo son colocadas verticalmente mediante balsas donde las bombas son sumergidas en el agua y los motores trabajan al aire libre como se muestra en la Figura 14.

Figura 14: Representación gráfica de una Poza



Fuente: Elaboración propia

Tanque de Rebombeo

Este tipo de estructura es una unidad fija que debe ser construido teniendo en cuenta un horizonte de vida lo suficientemente largo de la mina, así como que su ubicación no afectará el plan de minado. Al igual que las pozas, cuentan con varias unidades de bombeo (Motor – Bomba – Tablero) y se tienen los mismos criterios para el cálculo de los indicadores de desempeño.

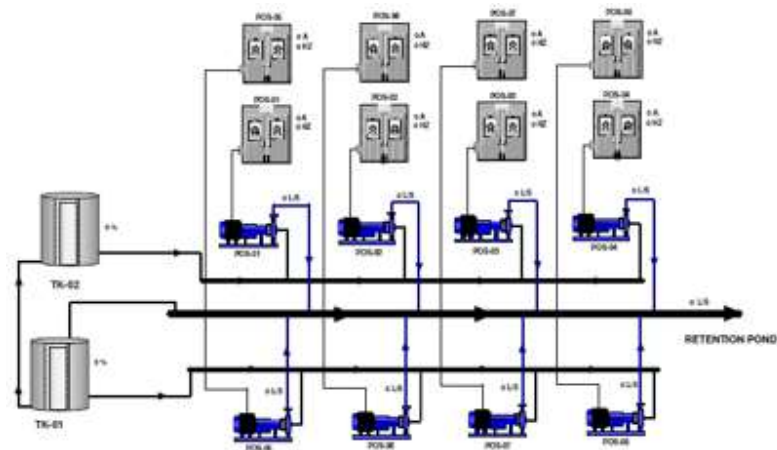
En comparación con las pozas, presentan menor cantidad de concentración de sólidos, sin embargo, al presentar las pozas sedimentos en el agua, también son transportadas hacia los tanques de almacenamiento por lo que es necesario programar también un proceso de limpieza, pero con una mayor frecuencia.

Tienen como ventaja el de contar con un diseño adecuado de ingeniería que cumpla con los parámetros de operación de las bombas y motores, así mismo

es posible implementar equipos de instrumentación para el control y supervisión remoto de los parámetros de operación.

Como desventaja se tiene que un cálculo inadecuado en el diseño o modificaciones en la forma de operación y aplicación (por ejemplo, si se requiere bombear más agua o inestabilidad del terreno) generarán problemas en el sistema de bombeo como son la cavitación, la vibración y la pérdida de eficiencia del sistema. Esto debido a que los equipos utilizados es este tipo de estructura es muy diferente a la utilizadas en las pozas siendo más sensibles a cambios radicales en su forma de operación.

Figura 15: Representación gráfica de un Tanque de Rebombéo



Fuente: Elaboración propia

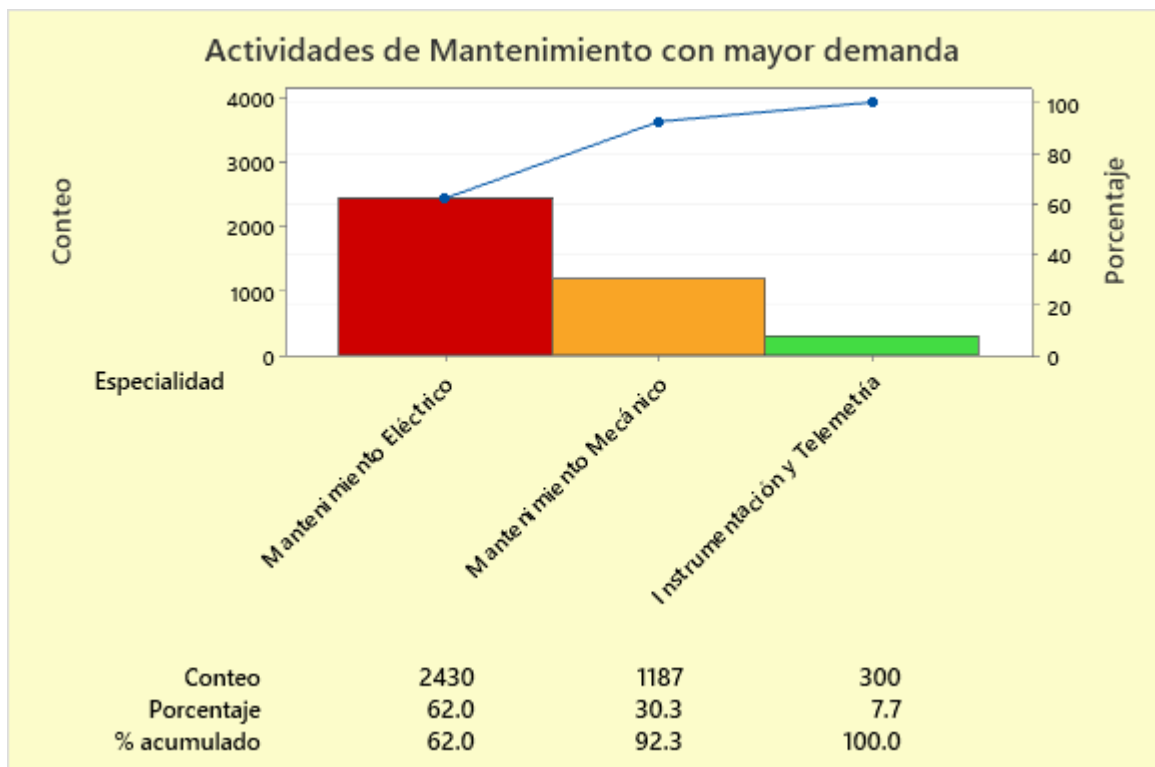
3.1.3 Categorización y análisis de los modos de falla críticos

Como parte del análisis deductivo, procedemos a categorizar e identificar los modos de falla críticos que afectan la confiabilidad de los tableros eléctricos para ello procedemos de un nivel general a un nivel específico.

3.1.3.1 Identificación de los Modos de Falla Críticos

La figura 16, muestra que las actividades de mantenimiento con mayor incidencia son los de tipo “eléctrico” con un 62%, seguido por las actividades de “mantenimiento mecánico” con el 30.3% quedando las actividades de “Instrumentación y telemetría” con un 7.7%

Figura 16: Pareto de las actividades de mantenimiento con mayor demanda



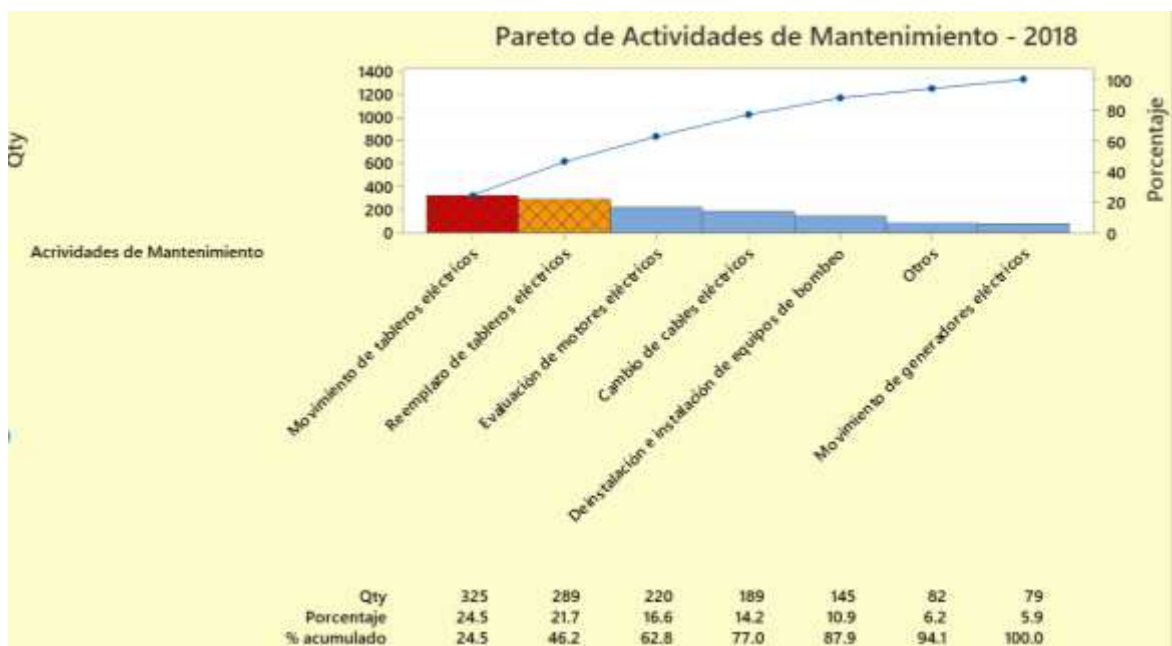
Fuente: Elaboración propia

Esta información nos orienta a enfocar el estudio de investigación hacia las posibles mejoras que se puedan identificar dentro del mantenimiento eléctrico, donde resaltan componentes como: motores eléctricos, tableros de control eléctrico, transformadores de energía y líneas de distribución eléctrica.

Dentro de las actividades que se realizan como parte del mantenimiento eléctrico encontramos:

- Movimiento de tableros eléctricos debido a falta de capacidad de energía.
- Cambio de cables eléctricos de mediana y baja tensión.
- Reemplazo de tableros de control eléctrico por fallas internas.
- Evaluación de motores eléctricos debido a bajo aislamiento
- Desinstalación e instalación de tableros eléctricos debido a necesidades operativas de minado.
- Movimiento de generadores eléctricos por necesidad operativa

Figura 17: Pareto de actividades frecuente de mantenimiento



Fuente: Elaboración propia

La figura 17 muestra que el 46.2% de las actividades de mantenimiento se centran realizar el movimiento de los tableros eléctricos, debido principalmente a que el desempeño de éstas se ha reducido por altas horas de operación y en algunos casos debido a que se requieren utilizar equipos con mayores prestaciones para otros sistemas de bombeo de mayor potencia. La segunda actividad es el del reemplazo y/o evaluación de los tableros eléctricos debido a fallas internas de operación tales como: Eventos de alta temperatura, fallas en el sistema de protección, falta de refrigeración interna del equipo, falla del variador, desconfiguración del sistema, problemas del sistema de regulación de corriente entre otros.

3.1.3.2 Análisis de los modos de falla críticos

Como parte del proceso de implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad, es necesario identificar los modos de fallas comunes de los tableros de control eléctrico, determinando la criticidad de cada uno de éstos.

La herramienta de la matriz para el análisis de modos de falla, efectos y criticidad permitirá definir las acciones necesarias para mitigar y/o eliminar el impacto de cada uno de estos modos de falla y por ende el de incrementar su confiabilidad.

La figura 18 muestra los modos de falla comunes que presentan los tableros de control eléctrico donde se puede determinar la criticidad de cada uno de éstos de acuerdo a su valor RPN (Número de riesgo prioritario) el cual contiene tres factores que son: Severidad, Frecuencia y detectabilidad.

Figura 18: Matriz de Modos de falla, efectos y criticidad de los tableros de control eléctrico

MATRIZ DE ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTOS Y CRITICIDAD									
COMPONENTE	FUNCIÓN	MODO DE FALLA POTENCIAL	EFEECTO POTENCIAL DE FALLA	SEVERIDAD	CAUSA POTENCIAL DE FALLA	OCURRENCIA	CONTROLES ACTUALES DE DETECCIÓN	DETECTABILIDAD	RPN = S x O x D
TABLEROS DE CONTROL ELÉCTRICO	Controlar y proteger a los equipos que funcionan con energía eléctrica de variaciones significativas de energía. Permiten además realizar un arranque suave durante la primera marcha y contienen mecanismos de monitoreo de las variables operativas del equipo	Temperatura elevada de variador	- Equipo se apaga repentinamente como medida de precaución	6	- Falta del sistema de enfriamiento - Acumulación de polvo en la zona interior del tablero eléctrico	7	Los operadores reportan directamente cada vez que el tablero se apaga luego de su inspección diaria	8	336
		Falla del sistema de protección	- Falta del motor eléctrico por sobre corrientes. - Falta progresiva del motor eléctrico		- Altas horas de operación - Baja calidad de los componentes internos	6	Evaluación periódica de acuerdo al plan de mantenimiento	6	216
		Desconfiguración del regulador de corriente	- Eventos de temperatura del motor eléctrico		- Sobre cargas en el tablero eléctrico. - Manipulación inadecuada por parte de los operarios del equipo	5	Medición de flujo a la salida de los sistemas de bombeo	7	210
		Recalentamiento las llaves de fuerza	- Evento de temperatura del tablero eléctrico		- Altas horas de operación - Sobre cargas de corriente en la entrada	4	Evaluación periódica de acuerdo al plan de mantenimiento	6	144
		Fallas en el núcleo del transformador de corriente	- Equipo se apaga repentinamente como medida de precaución		- Sobre cargas de corriente al ingreso del tablero eléctrico. - Altas horas de operación.	4	Evaluación periódica de acuerdo al plan de mantenimiento	5	120

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a esta matriz, se puede identificar que el modo de falla “Temperatura elevada de variador” es el más crítico con un RPN = 336, donde la única forma de advertir de esta falla es cuando el operador lo reporta al área de mantenimiento. como causas de este problema tenemos que el sistema de enfriamiento no funciona o es deficiente, así como también que existe gran acumulación de polvo en el interior del tablero de control eléctrico propio de estar operando a campo abierto.

Para este modo de falla no existe un programa de mantenimiento frecuente por lo que representa una oportunidad de mejorar para poder mitigar el impacto de las fallas de los tableros de control eléctrico.

El segundo modo de falla representativo es el de “Falla del sistema de protección” con un RPN = 216, donde se ha podido identificar que dentro de las causas de fallas se encuentran las altas horas de operación y la baja calidad de los componentes, las consecuencias se muestran directamente en la falla del motor eléctrico por bajo aislamiento o pérdida de potencia. Como controles actuales se ha identificado que se cuenta con un programa periódico, cada 3 meses, de inspecciones y evaluaciones a este mecanismo de protección para comprobar su funcionamiento.

El tercer modo de falla es “la desconfiguración del tablero” con un RPN = 210, donde se tienen como causas las sobre cargas de la energía de entrada al tablero de control eléctrico y la manipulación inadecuada de los operadores, no existe un mecanismo de control que advierta de que este modo de falla se está presentando por lo que existe una gran oportunidad de mejora para mitigarlo. Como consecuencia de este modo de falla, el motor eléctrico presentará un decaimiento progresivo de su rendimiento hasta presentar una falla funcional.

El objetivo de la matriz de análisis de modos y efectos de falla es el de reducir el valor RPN influyendo en alguno de sus tres factores que la conforman: (1) Reducir la severidad, (2) Incrementar la frecuencia y/o (3) Mejorar la detectabilidad. Para ello se deben plantear estrategias proactivas con responsables y planes de acción que permitan mejorar la Gestión del área de mantenimiento.

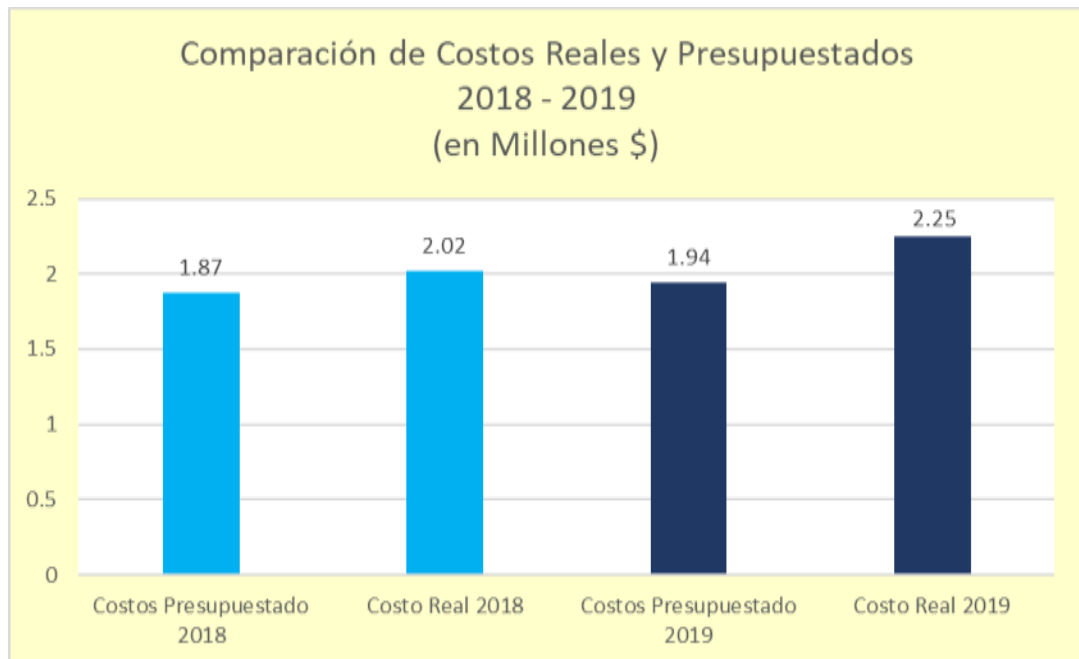
3.2.3 Desempeño de los principales indicadores de gestión de mantenimiento del área de servicios

(1) Costos

La figura 19 muestra el desempeño de los costos en millones de dólares durante los años 2018 y 2019 entre lo presupuestado y lo real.

Durante el 2018 se presupuestó \$ 1.87 M vs los \$ 2.02 M gastados en ese periodo, durante el 2019 se presupuestó \$ 1.94 M vs los \$ 2.25 M gastados durante ese periodo.

Figura 19: Comparación de costos reales vs presupuestados 2018 - 2019



Fuente: Base de datos del área de planeamiento mina

Como se puede apreciar en los dos años de evaluación, los costos reales han sido mayores a los costos presupuestados, esto debido a que se han realizado mayores gastos debido a las fallas de los equipos que son administrados por el área de mantenimiento.

Como parte del proyecto, se ha identificado que uno de los componentes que tiene mayor impacto en el sistema de bombeo son los tableros de control eléctrico, por lo que, al incrementar su confiabilidad, mitigando el impacto de sus modos de falla, permitirá ajustar los costos reales al presupuesto realizado

por el área de mantenimiento, donde incluso se pueden reducir los costos operativos al implementar estrategias adecuadas de mantenimiento.

En ambos años existe una desviación positiva de los costos de mantenimiento tal como se muestra en la Tabla 5 donde se aprecia un incremento del 8% durante el 2018 y del 16% durante el 2019.

Tabla 4: Variación de costos 2018 vs 2019

Variación costos	Desv. (\$ M)	%
2018	+ 0.15	8%
2019	+ 0.31	16%

Fuente: Base de datos del área de planeamiento mina

(2) Nivel de cumplimiento de trabajos programados

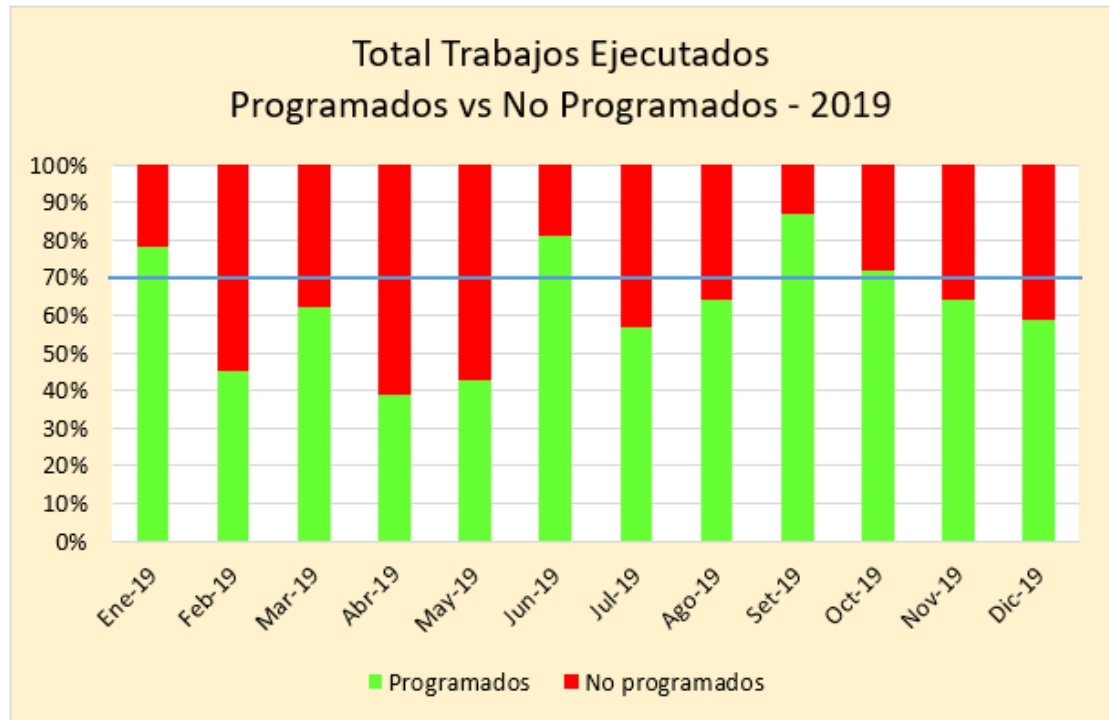
De acuerdo a los registros de los trabajos totales realizados durante el 2019, se pudo realizar una comparación entre los trabajos realizados que fueron programados y aquellos trabajos que se realizaron de manera correctiva “No programados”. Los datos son mostrados en la figura 20 donde se puede apreciar que existe una gran variación de los trabajos programados por lo que se puede inferir en que el proceso de planificación se encuentra fuera de control debido a las fallas recurrentes de los equipos del área de mantenimiento.

También se puede apreciar que en general, no se ha podido alcanzar el objetivo del 70% de los trabajos programados, salvo en los meses de enero y setiembre del 2019 lo que significa que existe una gran oportunidad de mejora dentro de la gestión de mantenimiento del área de servicios.

Si bien es cierto que dentro de este análisis se encuentran todos los trabajos que corresponden al área de mantenimiento, se puede deducir que los tableros de

control eléctrico representan un porcentaje significativo de las causas de los trabajos no programados, esto justificado en la figura 16 donde se mostraron las categorías de trabajo con mayor demanda realizadas durante el mismo periodo de evaluación.

Figura 20: Total de trabajos programados vs no programados



Fuente: Base de datos del área de planeamiento

En general, durante el año 2019, la proporción de trabajos programados fue del 63% en comparación del 37% de los trabajos que no fueron programados, teniendo como objetivo de superar el 70% de trabajos totales. La tabla 5 muestra el resumen de los trabajos totales ejecutados durante el 2019.

Tabla 5: Resumen de trabajos ejecutados 2019

Trabajos Ejecutados 2019	%
Programado	63%
No Programado	37%

Fuente: Elaboración propia

Luego de identificar la proporción de los trabajos programados en comparación del total de trabajos ejecutados, es necesario medir el cumplimiento del plan de mantenimiento actual. La figura 21 muestra que los trabajos que fueron programados se encuentran por debajo del 95% esperado durante los meses del año 2019. Esto puede deberse a que no se cuenta con la suficiente cantidad de recursos necesarios para ejecutar los trabajos o debido a que la cantidad de fallas que se presentan supera la capacidad de respuesta del área de mantenimiento.

Figura 21: Cumplimiento del plan durante el 2019



Fuente: Elaboración propia

También puede apreciarse que el nivel de cumplimiento de los trabajos programados presenta mucha variabilidad teniendo valores desde los 65% hasta el 95% por lo que es necesario controlar los modos de falla más críticos de los principales componentes y/o equipos que administra el área de mantenimiento.

El cumplimiento del plan de mantenimiento es un indicador del área de planeamiento que busca mediar la capacidad de respuestas del equipo de mantenimiento donde están involucrados: estrategia, confiabilidad, ejecución y planificación, el lograr conseguir superar el objetivo del 95% reflejará que se

está realizando un trabajo eficiente, controlando las principales variables que afectan su cumplimiento.

(3) Tiempo promedio entre fallas – MTBF

Para el siguiente trabajo de investigación se realizó el análisis de los tiempos promedios entre fallas de los tableros de control eléctrico con la finalidad de determinar la cantidad de días que trabaja en promedio un tablero de control eléctrico hasta quedar inoperativo.

La figura 22 muestra los tiempos promedios entre fallas (MTBF) de los meses del 2019 los cuales varían entre 90 a 280 días. Si bien es cierto que el área de mantenimiento no tiene un objetivo para poder compararse y definir si los valores mostrados están dentro o fuera de lo esperado, la información mostrada nos da una clara idea de cómo se desempeñan los tableros de control eléctrico y además nos permitirá tomarlo como un punto de referencia sobre el cual mejorar la confiabilidad de estos equipos.

El desempeño del MTBF durante el año 2019 ha sido en promedio de 176 días de operación hasta que se presenta la falla y deja inoperativo el equipo.

Las causas principales fueron detalladas en la Matriz de análisis de modos de fallas, efectos y criticidad mostradas en la figura 18 donde al implementar estrategias que estén enfocadas a mitigar o eliminar estos modos de fallas críticos permitirá que se incremente el valor numérico del MTBF, logrando con ello mayor confiabilidad de los equipos.

Figura 22: Tiempos promedios entre fallas de los tableros de control eléctrico



Fuente: Elaboración propia

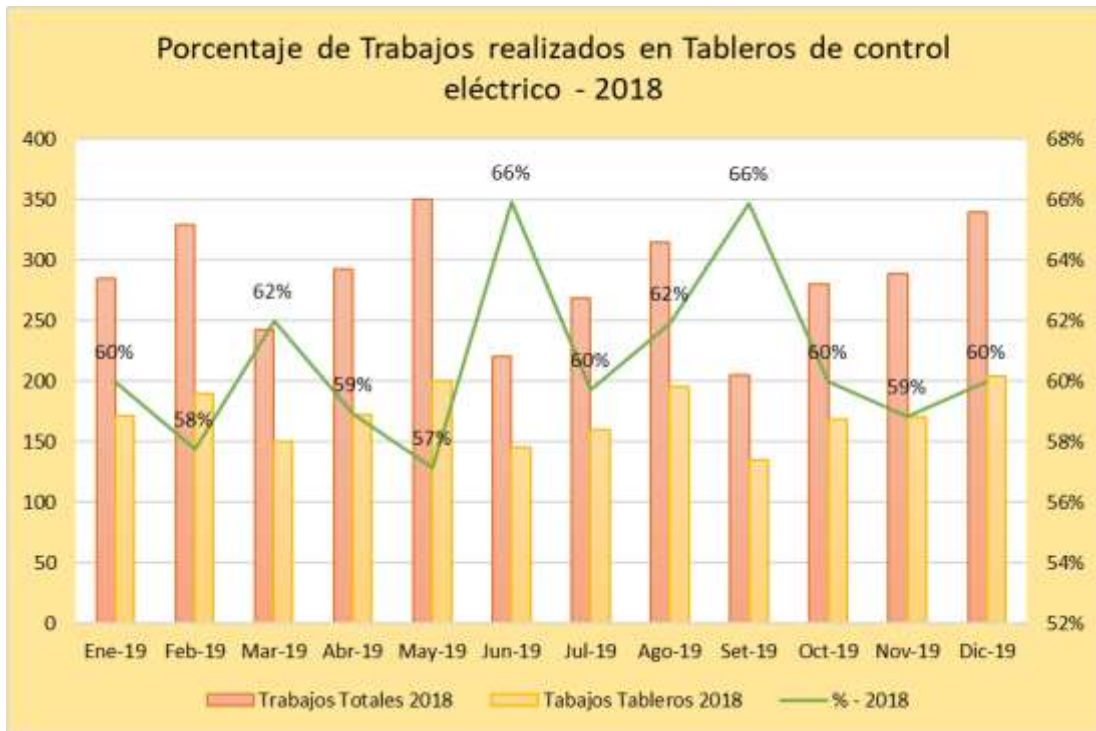
De acuerdo a la figura 22, los meses junio y julio se presentó menor confiabilidad de los tableros de control eléctrico, mientras que, durante los meses de marzo y octubre, la confiabilidad de estos equipos se incrementó al presentarse menos paradas no programadas producto de fallas inesperadas.

(4) Trabajos realizados en tableros de control eléctrico

Analizando la cantidad de trabajos que se han realizado durante los años 2018 y 2019 podemos determinar la proporción de trabajos que estuvieron relacionados a los tableros de control eléctrico.

La figura 23 muestra la cantidad de trabajos que fueron realizados durante el año 2018, del cual el 60.32% pertenecen a trabajos realizados en los tableros de control eléctrico. Se aprecia que, durante todos los meses del año 2018, la proporción de trabajos relacionados a los tableros de control eléctrico estuvieron entre el 57% al 66% manteniéndose una tendencia estable entre esos dos valores.

Figura 23: Porcentaje de trabajos realizados en tableros de control eléctrico durante el 2018



Fuente: Elaboración propia

La figura 24 muestra la proporción de los trabajos realizados durante el año 2019, donde el porcentaje de los trabajos de los tableros de control eléctrico fue del 61.74 %, valor que es muy similar al del año 2018 por lo que se puede inferir en que el desempeño se mantiene y existe una ventana de oportunidad para la implementación de estrategias que permitan reducir la cantidad de trabajos realizados y por ende tener mayor tiempo operativos dichos componentes incrementando con esto su confiabilidad y disponibilidad operativa del equipo.

Figura 24: Porcentaje de trabajos realizados en tableros de control eléctrico durante el 2019



Fuente: Elaboración propia

Este indicador nos permite evaluar si la cantidad de trabajos referidos a los tableros de control eléctrico disminuyen conforme se vayan realizando las mejoras en la gestión de mantenimiento del área de servicios. Un menor valor de la proporción, indicará que se están reduciendo las atenciones por las fallas comunes en estos equipos.

3.2 Análisis de confiabilidad de los tableros de control eléctrico

Para realizar el cálculo de la confiabilidad de los tableros de control eléctrico, es necesario analizar los tiempos promedios entre fallas de estos equipos y determinar el tipo de distribución que mejor modela los datos recopilados y mostrados en la figura 22, para ello se han considerado un horizonte de tiempo de 200 días, donde se evaluará la confiabilidad de dichos equipos.

La confiabilidad, más allá de un término cualitativo, viene a ser la probabilidad de que un equipo no falle en cierto tiempo de funcionamiento y bajo ciertas condiciones de operación. Las condiciones de operación ya están definidas por el contexto aplicativo del área usuaria de los equipos (Operaciones), por lo que solo estaría

pendiente evaluar en determinado tiempo de funcionamiento para determinar su valor numérico que se encuentra entre 0% y 100%.

3.2.2 Cálculo de confiabilidad de acuerdo a los tiempos promedios de falla - MTBF

Mediante la prueba de “identificación de distribución individual” se puede determinar el tipo de distribución de los tiempos promedios entre fallas (MTBF) de los meses del año 2019. Para ello se ha utilizado el software estadístico del Minitab mostrando los resultados en la tabla 7.

Los valores del MTBF son representados por la distribución que tenga un valor “P” mayor al 0.05, mientras más alto sea este valor, mejor será modelado por la distribución que la representa.

El software estadístico puede evaluar los datos para las distribuciones más conocidas, sin embargo, esto no significa que sean las únicas distribuciones estudiadas por lo que se debe tener cuidado en seleccionar adecuadamente dicha distribución.

Tabla 6: Prueba de bondad de ajuste

Distribución	AD	P	LRT P
Normal	0.243	0.703	
Transformación Box-Cox	0.271	0.607	
Lognormal	0.344	0.425	
Lognormal de 3 parámetros	0.264	*	0.430
Exponencial	2.832	<0.003	
Exponencial de 2 parámetros	1.074	0.036	0.000
Weibull	0.250	>0.250	
Weibull de 3 parámetros	0.285	>0.500	0.548
Valor extremo más pequeño	0.387	>0.250	
Valor extremo por máximos	0.357	>0.250	
Gamma	0.309	>0.250	
Gamma de 3 parámetros	0.707	*	1.000
Logística	0.259	>0.250	
Loglogística	0.346	>0.250	

Loglogística de 3 parámetros 0.260 * 0.440

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 6, las distribuciones que mejor modelan los datos son: La distribución Normal con un valor $P = 0.703$ y la distribución Weibull de tres parámetros con un valor $P > 0.50$

Para nuestro el presente trabajo de investigación, consideraremos la distribución Normal con la finalidad de determinar el valor de la confiabilidad de los tableros de control eléctrico.

Una de las características de la distribución Weibull es que nos permite definir la naturaleza de las fallas de los equipos pudiendo estar en alguna de las categorías como: Mortalidad infantil, fallas aleatorias o fallas por tiempo de uso. Para ello es necesario conocer los valores de los parámetros de dicha distribución.

La tabla 7, muestra los valores de los parámetros para cada tipo de distribución analizada por el software estadístico.

Analizando el valor del parámetro de forma (β) = 2.45332, se puede asegurar que las fallas de los tableros de control eléctrico se dan en la etapa de vejez debido a las altas horas de operación y/o fatiga en el equipo o componentes internos de ésta, por lo que la estrategia de mantenimiento preventivo será la que mejor se aplique con la finalidad de reducir las fallas internas de dichos tableros de control eléctrico.

Valores cercanos del parámetro de forma (β) a 3.44 hacen que los datos se acerquen a la distribución normal, tal como se indicó en la tabla 6, con un valor “P” mayor al 0.05.

Tabla 7: Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	175.91667		53.01879	
Transformación de Box-Cox*	13.11841		2.04243	

Lognormal*	5.12475	0.32301	
Lognormal de 3 parámetros	6.72435	0.06087	-658.05283
Exponencial		175.91667	
Exponencial de 2 parámetros		93.72690	82.18943
Weibull		3.83090	194.65390
Weibull de 3 parámetros		2.45332	130.36911
Valor extremo más pequeño	201.56904	50.61707	
Valor extremo por máximos	150.79243	46.67033	
Gamma		11.21098	15.69146
Gamma de 3 parámetros		940.89227	1.65359
Logística	176.28600	29.38048	-1394.09520
Loglogística	5.14913	0.17882	
Loglogística de 3 parámetros	8.34568	0.00698	-4035.79681

* Escala: Estimación de ML ajustado

Fuente: Elaboración propia

El valor umbral (γ) = 60.31671, indica que hasta el día 60 a 61 de operación no se presentan fallas en el equipo, por lo que no existen fallas debido a mortalidad infantil o durante el proceso de instalación y puesta en marcha de los tableros de control eléctrico.

El parámetro de escala (η) = 130.36911, nos indica que una vez que los tableros de control eléctrico hayan llegado a 130 ó 131 días de operación, al menos el 63.2% de la población de dichos tableros habrá fallado, esto quiere decir que habrá una confiabilidad del 36.8%.

Para nuestro estudio, consideraremos que los datos de los tiempos promedios entre fallas MTBF corresponden a una distribución normal cuyos parámetros se muestran en la tabla 8.

Tabla 8: Parámetros de la distribución normal de los tableros de control eléctrico

Parámetros Dist. Normal	Valor	Unidad
Promedio	175.92	días
Desviación	53.01	días

Fuente: Elaboración propia

Con los valores de los parámetros se realizará el cálculo de la confiabilidad de los tableros de control eléctrico, teniendo en cuenta la fórmula de la ecuación 2

Ecuación 2: Fórmula para el cálculo de la confiabilidad

$$R_{(t)} = 1 - F_{(t)} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

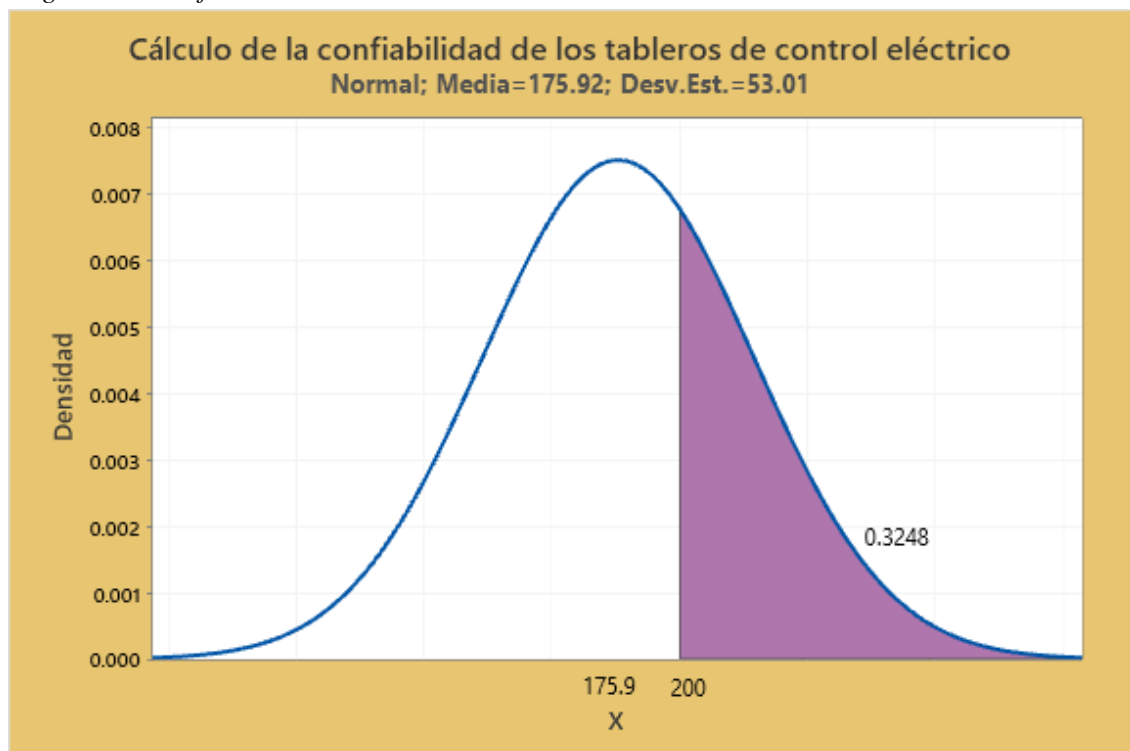
$R_{(t)}$: Confiabilidad

$F_{(t)}$: Probabilidad de fallas

t : tiempo de funcionamiento deseado

Utilizando el software estadístico Minitab, se procederá a calcular la confiabilidad, teniendo en cuenta los días de evaluación que son de 200 días de operación.

Figura 25: Confiabilidad de los tableros de control eléctrico



Fuente: Elaboración propia

La figura 25, muestra el valor de la confiabilidad de acuerdo a los parámetros calculados, donde para los 200 días de operación se espera que el 32.48% de los tableros de control eléctrico superen los 200 días de funcionamiento sin presentar fallas.

No se cuenta con un estándar para realizar la comparación de este valor de confiabilidad, sin embargo, todas las acciones y oportunidades de mejora que se implementen como parte del presente trabajo de investigación, permitirán incrementar este valor, logrando de esta manera el incremento cuantitativo del valor de la confiabilidad.

3.3 Propuesta de plan de mejora para la gestión de mantenimiento del área de servicios

3.3.1 Mejora del Proceso de Mantenimiento del área de servicios

Una de las herramientas de planificación y mejora del proceso de la gestión de Mantenimiento es el de re – diseñar el mapa de proceso actual, con la finalidad de modificar la secuencia de actividades que se están ejecutando logrando la optimización del proceso integral de la gestión de mantenimiento del área de servicios mediante la reducción de tiempos de atención, identificación temprana de los modos de falla críticos, la correcta administración de la información a todo nivel así como, la integración de las áreas que están involucradas dentro de todo este proceso.

De acuerdo al levantamiento del mapa de procesos mostrado en la figura 2, se está planteando la mejora de dicho mapa de procesos el cual es mostrado en la figura 26,

donde uno de los elementos fundamentales es el de incluir la participación del “área de inspecciones” dentro de todo el manejo de las principales actividades de gestión de mantenimiento del área de servicios.

El área de inspecciones será el encargado de alertar de la aparición y nivel de criticidad de los modos de fallas identificados en la matriz de Modos de falla, efectos y criticidad mostrado en la figura 18, mejorando con ello el nivel de detectabilidad da cada modo de falla analizado, así como de otros modos de falla que no se hayan considerado en dicha matriz. Una vez que se haya identificado un modo de falla en particular, deberá evaluarse el nivel de criticidad existiendo dos condiciones: (1) El equipo no puede seguir operando (2) La falla aun es manejable. Para el primer caso, deberá comunicar al personal de ejecución de mantenimiento para que pueda tomar las acciones correctivas necesarias y evitar de esta manera consecuencias mayores en caso el equipo llegue a fallar por completo, de esta manera se reducen los tiempos de atención y costos de reparación de los equipos.

En el segundo caso, el inspector es responsable de generar una orden de trabajo a modo de backlog para que la corrección del problema se realice mediante una planificación programada por el área de planeamiento, de esta manera se evitan mayores tiempos de parada e impacto en la disponibilidad de los equipos, así como la disminución de los costos de reparación de los componentes.

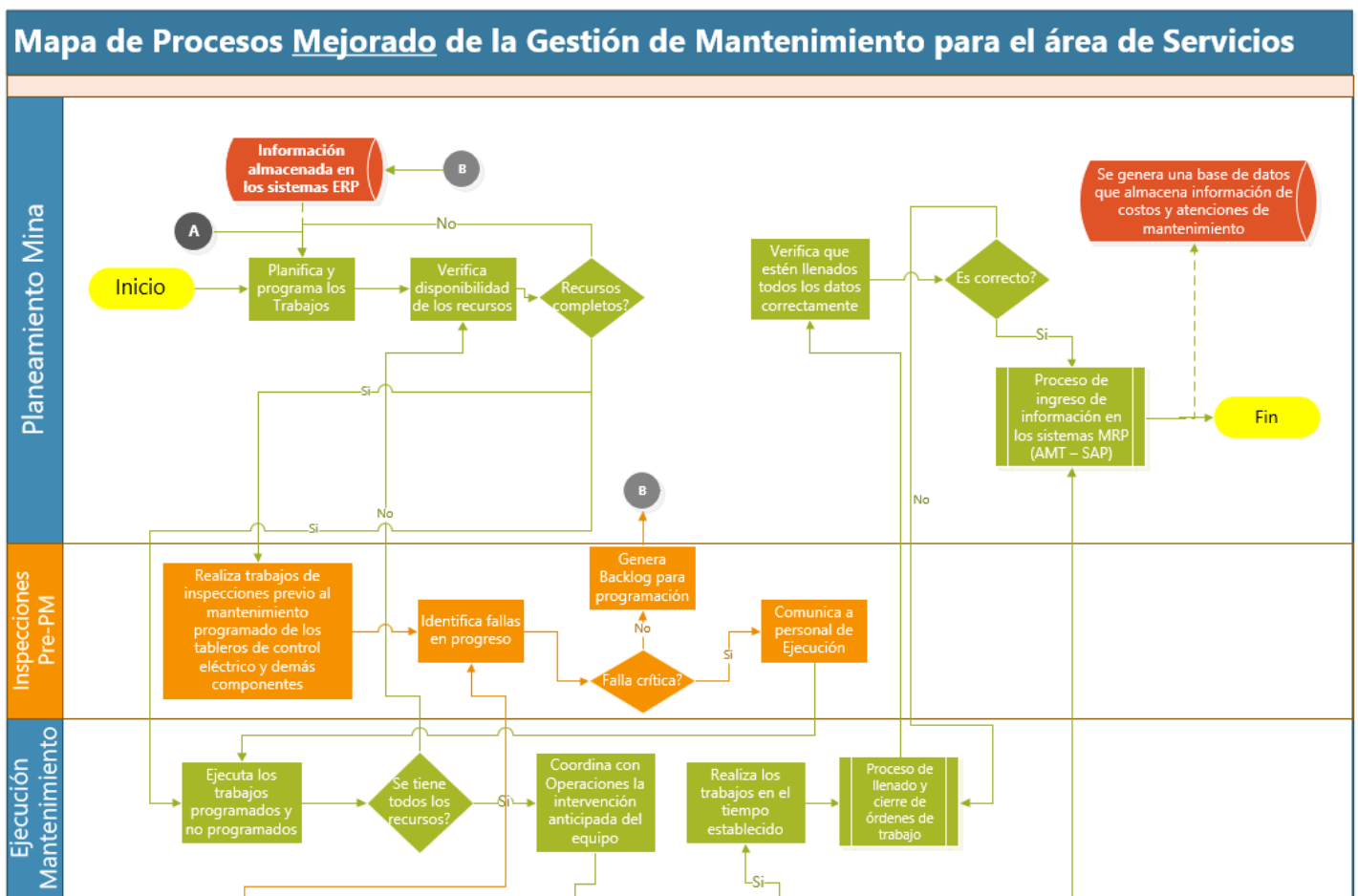
En ambos casos existe una gran ventaja para poder controlar los modos de fallas críticos mediante el trabajo que tiene que realizar el área de inspecciones el cual está alineado a conseguir los objetivos del presente trabajo de investigación.

Otra de las actividades que se ha incluido en el re - diseño del mapa de procesos es el que el área de operaciones reporte al área de inspecciones mediante un check list tipo bitácora acerca de las anormalidades que se puedan presentar durante el

funcionamiento normal de los equipos, el inspector deberá definir el nivel de criticidad de la “anormalidad” realizando alguna de las acciones mencionadas líneas arriba. De esta manera se suman dos esfuerzos de diferentes áreas: Operaciones y Mantenimiento con el objetivo de tener un mayor control de los parámetros de funcionamiento de los equipos, con esto se mejora aún más la detectabilidad de los modos de falla identificados.

También se propone que el área de “Confiabilidad de Mantenimiento” sea el encargado de realizar el cálculo, publicación y presentación a todo nivel de los principales indicadores de gestión de mantenimiento del área de servicios, en especial los mostrados en la tabla 3, tales como: (1) Confiabilidad de los equipos, (2) Tiempo medio entre fallas MTBF, (3) Nivel de trabajos programados, (4) Porcentaje de trabajos realizados, (5) Cumplimiento de trabajos programados, (6) Nivel del cumplimiento del presupuesto del área.

Figura 26: Mapa de proceso con la mejora propuesta para optimizar la gestión de mantenimiento



Fuente: Elaboración propia

El re -diseño del mapa de procesos permitirá mejorar las actividades diarias dentro de la gestión de mantenimiento entre los principales actores del proceso integral del cuidado de los equipos del área de servicios.

Este nuevo mapa de procesos debe ser socializado entre todo el personal para que permita realizar un trabajo más ordenado, sistematizado con responsables del cumplimiento de cada una de las actividades y entregables descritas en el mismo.

3.3.2 Implementación de estrategias de mantenimiento de acuerdo a los modos de falla críticos identificados

De acuerdo a la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad y a la herramienta utilizada para el análisis de los modos de falla (Matriz de modos de falla, efectos y criticidad) mostrados en la figura 18, donde se realizó el cálculo numérico del valor RPN para cada modo de falla crítico identificado, se procede a

proponer y ejecutar las mejores estrategias que nos permitan reducir el valor de RPN tal como se muestra en la figura 27 los cuales son descritos de la siguiente manera:

- (1) Temperatura elevada del variador: Se propone realizar limpiezas periódicas mensuales que permitirán mantener el sistema del variador libre de contaminantes mejorando la transferencia de calor para un óptimo funcionamiento. Además, deberá incluirse dentro de la ruta de inspección semanal, la verificación del nivel de contaminación de estos elementos para evitar gran acumulación de contaminantes y realizar la limpieza respectiva antes que el problema sea más severo. También debe evaluarse con el fabricante o representante de fábrica las alternativas que existen en el mercado para mejorar la hermeticidad del compartimento que reduzca severamente el ingreso de los contaminantes.

Figura 27: Acciones recomendadas para cada modo de falla de acuerdo a la Matriz de falla, efectos y criticidad de los tableros de control eléctrico

COMPONENTE	FUNCIÓN	MODO DE FALLA POTENCIAL	EFECTO POTENCIAL DE FALLA	RPN = S x O x D	ACCIONES RECOMENDADAS	RESPONSABLE		RESULTADOS			
						FECHA DE CULMINACIÓN PREVISTA	FECHA DE CULMINACIÓN EFECTIVA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECTABILIDAD	RPN = S x O x D
TABLEROS DE CONTROL ELÉCTRICO	Controlar y proteger a los equipos que funcionan con energía eléctrica de variaciones significativas de energía. Permiten además realizar un arranque suave durante la primera marcha y contienen mecanismos de monitoreo de las variables operativas del equipo	(1) Temperatura elevada de variador	- Equipo se apaga repentinamente como medida de precaución	336	- Incluir dentro de la estrategia la limpieza periódica de los tableros de control eléctrico de manera mensual. - Incluir dentro de la ruta de inspección la verificación de la acumulación de polvos y contaminantes de manera semanal - Re diseñar el sistema de hermeticidad de los tableros de control eléctrico para evitar el ingreso de contaminantes.	Estrategia y Planeamiento 01/05/19		6	5	6	180
		(2) Falla del sistema de protección	- Falla del motor eléctrico por sobre corrientes. - Falla progresiva del motor eléctrico	216	- Analizar estadísticamente las frecuencia de cambio de los elementos de protección para incluirlos dentro de la estrategia de reemplazo programado - Realizar coordinaciones con el proveedor acerca de las mejoras que se pueden realizar al producto para extender las horas el ciclo de vida del elemento.	Estrategia y Ejecución 30/04/19			4	5	120
		(3) Desconfiguración del tablero	- Eventos de temperatura del motor eléctrico	210	- Realizar una revisión diaria de la configuración de los tableros eléctricos en apoyo con el personal de operaciones para asegurar el correcto funcionamiento del equipo. - Capacitar al personal de operaciones para que pueda ajustar las configuraciones de acuerdo al requerimiento del sistema. - Evaluar técnicamente la implementación de telemetría que permita la configuración de los tableros de control eléctrico de manera remota considerando la criticidad de los equipos.	Estrategia y Operaciones 30/03/19			4	5	120
		(4) Recalentamiento las llaves de fuerza	- Evento de temperatura del tablero eléctrico	144	- Analizar estadísticamente las frecuencia de cambio de los elementos de protección para incluirlos dentro de la estrategia de reemplazo programado - Realizar coordinaciones con el proveedor acerca de las mejoras que se pueden realizar al producto para extender las horas el ciclo de vida del elemento. - Analizar la calidad de corriente e instalar los mecanismos necesarios para controlar las sobre corrientes en el sistema.	Estrategia y Ejecución 30/05/18			3	4	72
		(5) Fallas en el núcleo del transformador de corriente	- Equipo se apaga repentinamente como medida de precaución	120	- Analizar la calidad de corriente e instalar los mecanismos necesarios para controlar las sobre corrientes en el sistema. - Definir la frecuencia de reemplazo del núcleo del transformador mediante el análisis estadístico del tiempo promedio entre fallas - MTBF	Estrategia y Confiabilidad 30/05/18			3	3	54

Fuente: Elaboración propia

Con la implementación de estas estrategias de mantenimiento se puede reducir el valor RPN de 336 puntos hasta 180 puntos trabajando principalmente en la reducción de la ocurrencia, así como en la detectabilidad.

(2) Falla del sistema de protección: Para reducir el impacto de este modo de falla se propone realizar un análisis estadístico de la frecuencia de fallas del mecanismo de protección con la finalidad de proponer una frecuencia definida del reemplazo de dicho elemento, considerar para ello que los tiempos de falla deben relacionarse al tipo de distribución normal para proponer una estrategia de mantenimiento programado, en caso de pertenecer al grupo de fallas aleatorias será recomendable implementar alguna estrategia de mantenimiento predictivo para advertir el modo de falla en su etapa potencial. Otra de las acciones es el de coordinar con el fabricante o representante de marca para mejorar la calidad de fabricación de este elemento, que soporte las condiciones de trabajo actuales en operación.

El valor del RPN se reducirá de 216 puntos hasta 120 puntos, por lo que la implementación de estas estrategias resultará efectiva para reducir las consecuencias de este modo de falla.

(3) Desconfiguración del tablero de control eléctrico: Para atacar este modo de falla es necesario realizar una verificación diaria de los parámetros actuales de cada sistema, esto con la finalidad de evitar que los equipos trabajen fuera de sus estándares de operación. Si bien es cierto que los técnicos mecánicos no podrían abastecerse para verificar todos los tableros de control eléctrico de la empresa

minera, se pueden soportar con el personal de operaciones quienes realizan la medición diaria de los parámetros de operación con son flujos, corriente, nivel de la napa freática, entre otros; para ello necesitan ser capacitados adecuadamente para poder realizar ajuste, modificación y comparación de las configuraciones de los tableros de control eléctrico.

Otra de las alternativas es el de evaluar la implementación de un sistema de telemetría que permita acceder a verificar la configuración de los parámetros de operación, así como la modificación en línea dependiendo del requerimiento de la operación. Este sistema de telemetría se podría instalar en los equipos críticos que requieren que se modifique frecuentemente la configuración.

El valor del RPN se reducirá de 210 puntos hasta 120 puntos, por lo que la implementación de estas estrategias resultará efectiva para reducir las consecuencias de este modo de falla.

- (4) Recalentamiento de las llaves de fuerza: Es necesario definir la frecuencia de cambio de estos elementos para evitar daños mayores en los tableros de control eléctrico, para ello será necesario analizar los tiempos promedios entre fallas de estos elementos lo que significa registrar las fallas cada vez que ocurran. Otra de las alternativas es el de consultar con el proveedor o fabricante acerca de las frecuencias recomendadas para realizar el reemplazo programado y mejorar la calidad del producto para extender la vida útil del mismo.

Es necesario también realizar el análisis de las corrientes de ingreso al tablero de control eléctrico con la finalidad de identificar corrientes parásitas, armónicos u sobretensiones que no pueden ser reguladas por los mecanismos de control de dichos elementos mecánicos.

Con la implementación de estas estrategias es posible reducir el valor RPN de 144 puntos a 72 puntos, reduciendo de esta manera las consecuencias de este modo de falla.

- (5) Fallas en el núcleo del transformador: Las fallas en este elemento de los tableros de control eléctrico son producidas por las fluctuaciones de corrientes y tensiones al ingreso de los tableros, produciéndose cargas no lineales que son sensibles a las variaciones del suministro eléctrico principalmente por utilizar tableros de mayor capacidad en función de lo requerido por el sistema de bombeo. Para ello es necesario analizar minuciosamente la calidad de energía y potencia de consumo con la finalidad de implementar reguladores o controladores de energía y disponer adecuadamente los tableros de acuerdo a la necesidad operativa.

Otra de las recomendaciones es el de determinar la frecuencia de cambio de dichos núcleos antes de que la falla ocurra o también realizar reparaciones mayores para restituir las funciones principales de dichos elementos.

Con estas acciones se reducirá el valor RPN de 120 puntos hasta 54 puntos enfocándonos en la reducción de la frecuencia de aparición de las fallas y mejorando la detectabilidad del modo de falla.

El uso de esta herramienta de confiabilidad, nos permite identificar claramente los modos de fallas críticos y plantear acciones concretas para reducir la criticidad y consecuencia en caso ocurriese dichos modos de falla, para lo cual se analiza la: Severidad (impacto en la producción, costos, medio ambiente y seguridad), La Ocurrencia (frecuencia de aparición del modo de falla) y la

Detectabilidad (Nivel de advertencia del modo de falla en su etapa inicial, antes que ocurra la falla total).

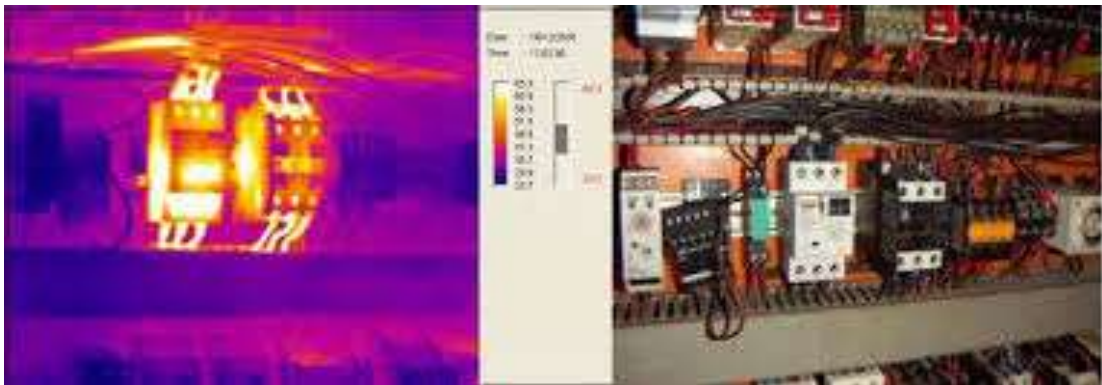
3.3.3 Implementación de un programa de mantenimiento predictivo

Una de las alternativas que se plantea como parte del presente trabajo de investigación, es el de utilizar la estrategia del mantenimiento predictivo.

Como se verificó en el mapa de procesos, mostrado en la figura 2, el área de mantenimiento solamente está aplicando las estrategias del mantenimiento correctivo (cuando fallan los equipos) y el mantenimiento preventivo (de acuerdo a frecuencias determinadas); sin embargo no existe una técnica específica para advertir los incrementos de temperatura que se generan dentro de los tableros de control eléctrico, por ello se recomienda utilizar la termografía infra roja de manera periódica para identificar modos de falla en su etapa potencial y tomar las acciones necesarias antes de que se presente la falla total del equipo.

La figura 28, muestra el espectro termográfico resultante de la medición mediante la cámara termográfica de las llaves de control del tablero de control eléctrico. De esta manera es posible realizar mediciones periódicas de la condición de la temperatura con la finalidad de identificar cambios repentinos en su funcionamiento producidos principalmente por soldaduras mecánicas, desgaste de contactos, sobre corrientes o falla del mecanismo de protección del equipo.

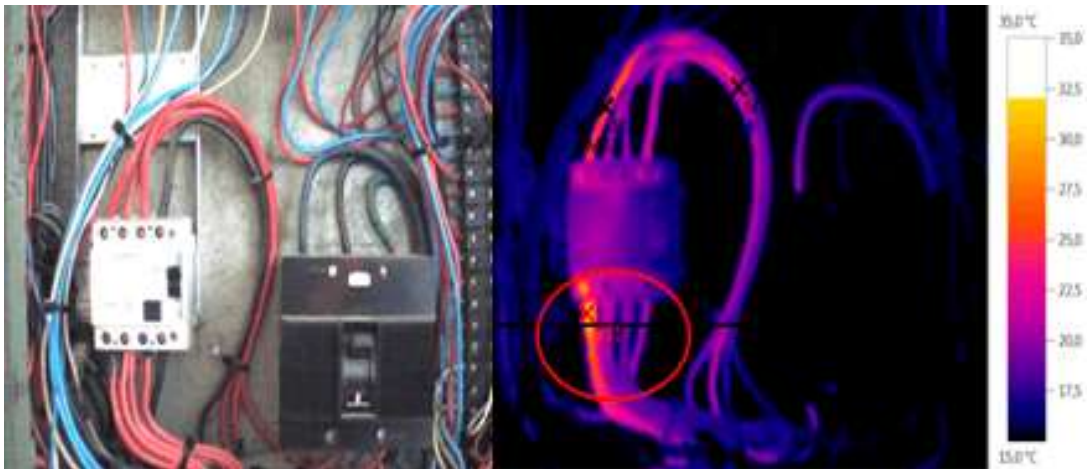
Figura 28: Registro termográfico de las llaves de control en un tablero de control eléctrico



Fuente: Fotografía tomada en campo

La figura 29, muestra que también es posible realizar mediciones a las conexiones eléctricas del cableado interno de los tableros de control eléctrico.

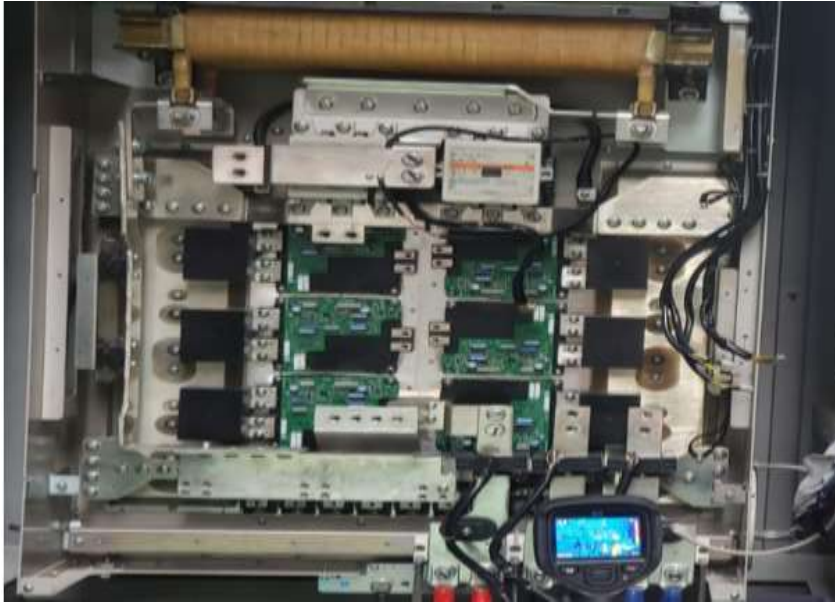
Figura 29: Registro termográfico a las conexiones internas dentro del tablero de control eléctrico



Fuente: Fotografía tomada en campo

La figura 30, muestra el equipo de medición de termografía que sería necesario para la medición periódica del parámetro de temperatura.

Figura 30: Demostración del uso de la cámara termográfica para el monitoreo de temperaturas

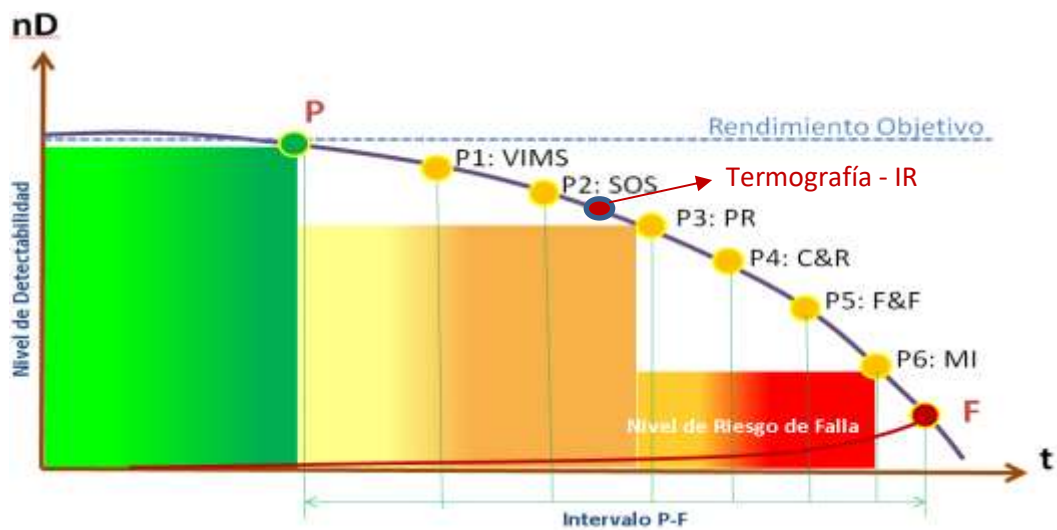


Fuente: Fotografía tomada en campo

Como se analizó en la matriz de modos de falla, efectos y criticidad, el incremento progresivo de la temperatura es uno de los síntomas comunes que se presentan como resultado de la falla de los tableros de control eléctrico por lo que la implementación del programa de mantenimiento predictivo permitirá advertir de manera temprana la aparición del problema con la finalidad de tomar acciones correctivas de manera oportuna.

La figura 31 muestra la curva P – F (Potencial de falla – Falla) el cual es muy aplicado como parte de la estrategia de mantenimiento.

Figura 31: Representación gráfica de la Curva P-F



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a esta curva, dependiendo de rendimiento objetivo deseado (temperaturas por debajo del límite máximo permisible) existe un nivel de detectabilidad que depende de la tecnología utilizada para advertir de manera temprana que un modo de falla está en vías de desarrollo. Para nuestro caso, el incremento de temperatura significará que ya se ha realizado la falla potencial y es necesario tomar las acciones correctivas para evitar que se convierta en una falla total.

Como todo programa de mantenimiento, la estrategia del mantenimiento predictivo requiere de una serie de pasos para ser implementado las cuales se detallan a continuación:

Primera Etapa: Monitoreo del funcionamiento del equipo

Es necesario, como primer nivel de la, leer nuestra máquina: es decir, disponer de forma permanente, automática (de ser posible) y digitalizada de los datos de proceso. Los parámetros relevantes y la frecuencia de lectura son totalmente dependientes de las características del proceso. Para nuestro caso hemos considerado que la medida

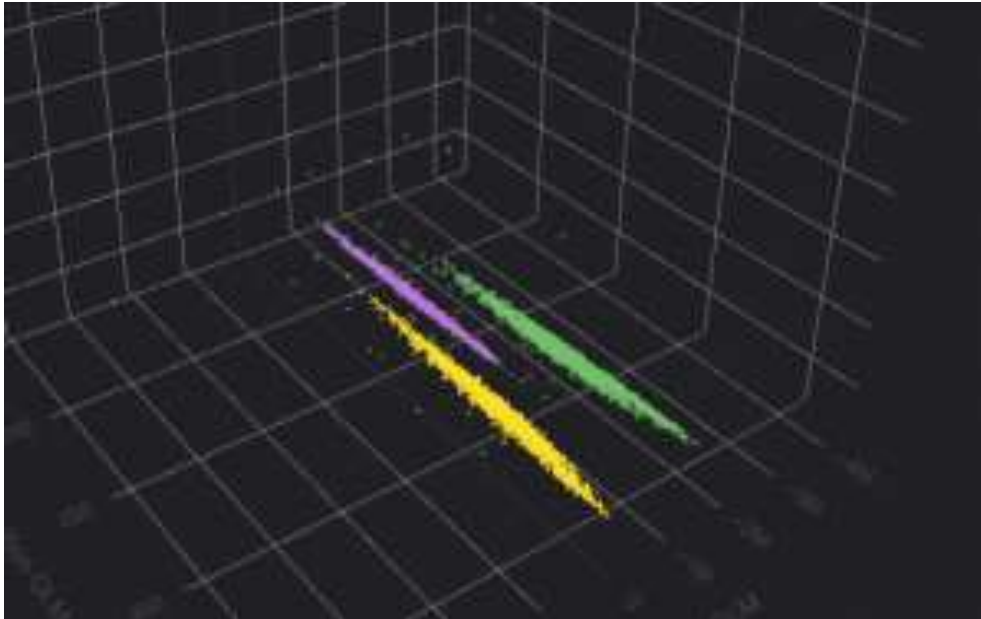
de temperatura es un parámetro crucial que nos permitirá advertir de fallas en proceso en los tableros de control eléctrico.

Segunda Etapa: Modelar el proceso de funcionamiento del equipo

Una vez medidos los parámetros relevantes del proceso es momento de generar histórico y llevar a cabo un análisis de cómo los valores medidos están determinando el comportamiento de nuestros equipos, y viceversa. Para ello nos valemos de algoritmos que relacionan parámetros y ponderan la influencia de unos sobre otros. En este proceso, cuanto mayor sea la cantidad de datos recolectados, más variabilidad podremos contemplar y mayor será la exactitud de correlación. Esto implica que a lo largo del tiempo seremos capaces de obtener resultados más precisos.

La figura 32 muestra el comportamiento variable de los parámetros de funcionamiento de los equipos como, por ejemplo: Temperatura, presión, velocidad, etc. Los cuales dependiendo de su comportamiento pueden presentar variabilidad en sus valores (promedio y desviación estándar).

Figura 32: Comportamiento de los diferentes parámetros evaluados como parte del mantenimiento Predictivo



Fuente: <https://www.lisdatasolutions.com/blog/pasos-para-implantar-un-plan-de-mantenimiento-predictivo/>

La relación ponderada de los parámetros nos permitirá modelizar el comportamiento normal de nuestras máquinas en el proceso. Esto es clave para alcanzar el mantenimiento predictivo, si bien no es suficiente todavía. En esta etapa podemos implementar lo que conocemos como Mantenimiento Preventivo Dirigido: vamos a seguir lanzando nuestras labores de mantenimiento de forma preventiva, pero, dado que ya conocemos el funcionamiento normal de nuestras máquinas, priorizamos aquellas que más afectadas estén, es decir, que más se desvíen de este funcionamiento normal.

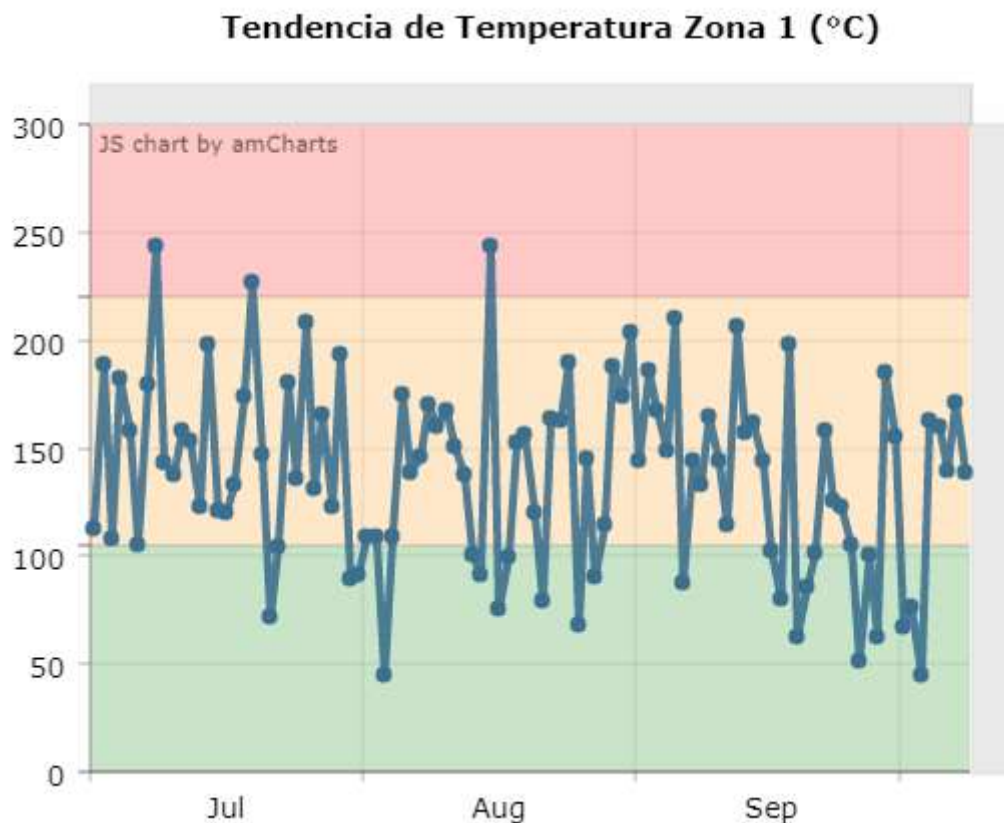
Tercera Etapa: Definir los niveles de advertencia – Límites

Mientras progresamos en esta hoja de ruta acumulamos cada vez más información. Conforme la información relacionada con las averías producidas se va enriqueciendo, mejoramos la definición de los límites de funcionamiento de nuestras

máquinas. Estos límites son las zonas en las que sabemos que la probabilidad de avería es superior a la admisible.

La figura 33 muestra un modelo para la configuración de los límites condenatorios de acuerdo al nivel de severidad del parámetro evaluado: Temperatura.

Figura 33: Modelo de límites permisibles de temperatura



Fuente: http://sistema.manpredict.com/plant_detail_equipment_pump

Se recomienda el modelo de las advertencias tipo semáforo, donde si el valor está dentro de la zona verde, significará que el equipo está trabajando dentro de su funcionamiento normal, si el valor recae dentro de la zona amarilla, significará que se está produciendo una falla potencial donde es necesario tomar acciones coordinadas y programadas y de estar el valor dentro de la zona roja, es inminente

que se va a producir la falla total del equipo por lo que una acción inmediata es necesaria.

Cuarta Etapa: Seguimiento y mejora continua del parámetro evaluado

En la primera etapa hemos modelado el funcionamiento normal de nuestra máquina. Posteriormente, durante la segunda y tercera etapa hemos analizado información para definir los límites dentro de los cuales nuestras máquinas no corren peligro. En este punto sabemos con certeza probabilística que sólo deberemos desplegar labores de mantenimiento en aquellas máquinas que lleguen a su zona de funcionamiento límite. Esto reducirá nuestras intervenciones a las estrictamente necesarias, además de proporcionarnos una visión general del estado de nuestros equipos de manera anticipada, algo que mejorará la coordinación con el área de operaciones y mantenimiento.

Figura 34: Modelo de integración y desarrollo de las estrategias de mantenimiento



Fuente: <https://www.lisdatasolutions.com/blog/pasos-para-implantar-un-plan-de-mantenimiento-predictivo/>

La figura 34 muestra el nivel de desarrollo de las estrategias de mantenimiento disponibles, el cual indica que para contar con una estrategia de mantenimiento predictivo es necesario controlar y administrar correctamente las estrategias de mantenimiento correctivo o reactivo, mantenimiento preventivo, mantenimiento a condición y por último el mantenimiento predictivo el cual requiere de un nivel superior de capacitación para la recolección e interpretación de información, equipos tecnológicos para la toma de datos (cámara termográfica) y un sistema de administración de datos que permita transformar en información para el análisis de las principales variables de operación de los equipos.

3.3.4 Implementación de un sistema de indicadores para el control frecuente del desempeño de los tableros de control eléctrico

Como parte del proceso de transformación en la gestión de los activos físicos, es necesario implementar un sistema de indicadores en línea que nos permitan realizar el seguimiento de las principales variables de operación y mantenimiento. Para ello el registro de información en tiempo oportuna, real y confiable permitirá contar con indicadores que se ajustan a la realidad para la toma de decisiones orientadas a corregir los modos de falla estudiados.

Se presentan los siguientes tableros de indicadores implementados para conseguir tal objetivo.

Figura 35: Tablero de Indicadores de Reporte General de Equipos



Fuente: Pantalla de PI-System

Tiene como alcance mostrar información acerca de los eventos activos de parada de equipos y partes de las estructuras del área de Servicios, con la finalidad de realizar el seguimiento de su ejecución en el tiempo establecido. Muestra además la disponibilidad diaria, mensual y anual. Se puede realizar filtro para cada una de las sub-áreas y por tipo de parada.

Figura 36: Reporte de Top Ten por Estructuras Operativas



Fuente: Pantalla de PI-System

Tiene como alcance mostrar las 10 estructuras que han tenido la mayor cantidad de paradas y a su vez han tenido la mayor duración acumulada. Se puede filtrar estas estructuras en un rango de fechas y área.

Figura 37: Reporte de Top Ten por Razones de parada

Fuente: Pantalla de PI-System



Tiene como alcance mostrar las 10 razones más frecuentes y con mayor duración que causan algún tipo de parada teniendo una tabla de información detallando: el tiempo de paradas, la frecuencia y promedio de duración. De la cual se obtiene un gráfico de burbujas de acuerdo a la tabla de información mencionada.

3.5 Resultados obtenidos de acuerdo a las dimensiones de las variables estudiadas

Tabla 9: Comparación entre indicadores actuales y esperados luego de la implementación del plan de mejora

Variable	Dimensiones	Indicadores	Indicadores actuales	Indicadores después del plan de mejora
Dependiente:				
Confiabilidad de los tableros de control eléctrico	Probabilidad de que no falle en 200 días de funcionamiento	Confiabilidad = $1 - P(F)$	32.48%	50.00%
	Tiempo Promedio entre Fallas (MTBF) evaluado en un mes de operación	MTBF (Días / Paradas) = (Total días de operación / N° Paradas)	176	200
Independiente				
Mejora de la gestión de mantenimiento del área de servicios	X1: Nivel Trabajos programados	= (Total de Trabajos Programados) / (Total de Trabajos realizados) x 100%	63%	70%
	X2: Porcentaje de trabajos realizados en tableros eléctricos respecto al total	= (Trabajos de Tableros eléctricos) / (Total de trabajos realizados) x 100%	62%	40%
	X3: Cumplimiento de trabajos programados	= (Total trabajos programados realizados) / (Total de trabajos programados) x 100%	80%	90%
	X4: Nivel de cumplimiento de presupuesto	= (Costos totales reales) / (Costos totales presupuestados) x 100%	116%	100%

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 9 muestra la comparación entre los valores de los indicadores actuales obtenidos como parte del trabajo de investigación y los valores esperados de los indicadores luego de la implementación del plan de mejora. En ella se puede observar que se espera un incremento para cada uno de estos indicadores que forman parte de las variables dependientes e independientes.

El incremento de la confiabilidad de los tableros de control eléctrico permitirá entre otros beneficios: (1) Incrementar las horas de funcionamiento, (2) Reducir los tiempos improductivos debido a fallas repentinas, (3) Incrementar la productividad del sistema de bombeo debido a más horas de operación, (4) Reducción de horas-hombre por parte del área de mantenimiento por la menor cantidad de fallas presentadas, (5) Reducción de costos de mantenimiento por menor intercambio de piezas del equipo, (6) Reducción del consumo de energía debido a que los equipos trabajaran a su capacidad de diseño. Estos beneficios permitirán lograr ahorros significativos para el área de mantenimiento y por ende a la empresa minera.

El 50% de confiabilidad se alcanzará siempre en cuando se logre obtener un tiempo promedio entre fallas (MTBF) de 200 días de operación. En la actualidad no existe un valor referencial de la confiabilidad para indicar si el 50% representa un valor satisfactorio, sin embargo, el presente estudio sienta las bases precedentes para comparaciones posteriores de otras realidades similares de operación considerando que la confiabilidad debe mantener una tendencia ascendente y consolidado en el tiempo de operación de los equipos.

3.5 Evaluación de la viabilidad técnica y económica del proyecto de investigación

3.5.1 Factibilidad económica del proyecto de investigación

Como parte de la evaluación financiera procedemos a calcular el Costo Promedio Ponderado del Capital (WACC) con datos asumidos con la finalidad de poder realizar una comparación acerca de la rentabilidad mínima de que debemos obtener para considerar la propuesta de investigación como viable desde el punto de vista económico.

Para ello se aplicó la siguiente fórmula del cálculo del WACC

$$WAAC = Kdt \times \left(\frac{D}{D + P} \right) + Ke \times \left(\frac{P}{D + P} \right)$$

Donde:

WAAC: Costo promedio ponderado de capital

Kdt: Costo de la deuda después de impuestos

Ke: Costo del patrimonio

D: Valor o proporción de la deuda

P: Valor o proporción del patrimonio

Se consideraron los siguientes valores:

Monto total de Inversión = \$ 320 000.00 (Ver detalle en la tabla 10)

De los cuales, el 50% fue cubierto con capital de la empresa y el restante 50% mediante apalancamiento financiero, en base a ello se determinan los valores de D y P

$$D = \$ 160\,000.00$$

$$P = \$ 160\,000.00$$

Se estimaron también los factores del costo de la deuda y del patrimonio en base a estimaciones del área de costos de la empresa minera

$$K_{dt} = 10\%$$

$$K_e = 18\%$$

Realizando el cálculo utilizando la ecuación EC.1

$$WAAC = 0.10 \times \left(\frac{160\,000}{160\,000 + 160\,000} \right) + 0.18 \times \left(\frac{160\,000}{160\,000 + 160\,000} \right)$$

$$WAAC = 14\%$$

Esta tasa WACC calculado en 14% será un valor referencial que deberá ser considerado para poder compararlo con los resultados del VAN y el TIR.

La tabla 10, muestra los principales conceptos que se necesitarán como parte de la inversión inicial para llevar a cabo las recomendaciones y propuestas del presente trabajo de investigación.

La tabla 11, muestra el detalle de los ahorros que se podrán generar como parte de la implementación de las mejoras propuestas, el cual está alineado a mantener el presupuesto del área de mantenimiento dentro de lo establecido por la empresa.

Tabla 10: Detalle de la inversión para la ejecución del proyecto

Inversión			
Concepto	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total (\$)
1.- Equipos y Herramientas			
1.1.- Equipo de termografía	4	\$ 2,900.00	\$ 11,600.00
1.2.- Kit de herramientas para mantenimiento	4	\$ 1,250.00	\$ 5,000.00
1.3.- Kit de herramientas para operaciones	4	\$ 1,075.00	\$ 4,300.00
1.4.- Instalación de módulos de registro de parámetros en los tableros de control eléctrico	80	\$ 650.00	\$ 52,000.00
1.5.- Analizador de calidad de energía	1	\$ 7,500.00	\$ 7,500.00
1.6.- Reemplazo de núcleos del transformador	20	\$ 895.00	\$ 17,900.00
1.7.- Reemplazo de partes defectuosas identificadas como parte de la inspección	60	\$ 800.00	\$ 48,000.00
Sub total (1)			\$146,300.00
2.- Personal			
			\$ -
2.1.- Asignación interna de técnicos inspectores	2	\$ 9,600.00	\$ 19,200.00
2.2.- Ingreso de planes estratégicos de mantenimiento al sistema ERP - SAP	1	\$ 3,500.00	\$ 3,500.00
Sub total (2)			\$ 22,700.00
3.- Sistemas informáticos			
3.1.- Compra de hardware para el manejo de indicadores en tiempo real	1	\$ 65,000.00	\$ 65,000.00
3.2.- Desarrollo de software	1	\$ 42,000.00	\$ 42,000.00
3.3.- Despliegue del sistema de administración de indicadores en tiempo real	1	\$ 25,000.00	\$ 25,000.00
Sub total (3)			\$132,000.00
4.- Programa de Capacitación			
			\$ -
4.1.- Capacitación de personal de mantenimiento - ejecución	1	\$ 7,500.00	\$ 7,500.00
4.2.- Capacitación de personal de operaciones	1	\$ 5,000.00	\$ 5,000.00
4.3.- Capacitación del personal de confiabilidad	1	\$ 6,500.00	\$ 6,500.00
Sub total (4)			\$ 19,000.00
Total			\$320,000.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Detalle de los ahorros debido al incremento de la confiabilidad

Incremento de la confiabilidad	
Concepto	Ahorro (Anual)
1.- Incremento del tiempo de ciclo de vida de los equipos	\$ 48,400.00
2.- Reducción de horas hombre para la atención de los equipos	\$ 38,400.00
3.- Reducción de repuestos cambiados debido a fallas	\$ 78,000.00
4.- Incremento de las horas de funcionamiento disponibles	\$ 55,200.00
Total	\$220,000.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Flujo de caja de la propuesta de mejora de la gestión de mantenimiento

Concepto	2021	2022	2023	2024	2025
Inversión & Mejoras anuales	\$ -320,000	\$ -30,000	\$ -30,000	\$ -30,000	\$ -30,000
Incremento de la Confiabilidad		\$ 220,000	\$ 220,000	\$ 220,000	\$ 220,000
Flujo Anual	\$ -320,000	\$ 190,000	\$ 190,000	\$ 190,000	\$ 190,000

Parámetro	Valor
WACC	14%
TIR	46%
VAN	\$ 204,917

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al flujo de efectivo anual, mostrado en la tabla 12, durante los 5 años de evaluación de la inversión, se obtuvieron los resultados del VAN = \$ 204 917.00 y TIR = 46%, el detalle del cálculo es mostrado en la Tabla 10, lo que demuestra que la rentabilidad real del proyecto es mayor al esperado, además considerando la tasa del WACC para el cálculo del VAN obtenemos un valor presente neto mayor a cero. Estos parámetros nos indican que el proyecto es viable desde el punto de vista económico.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

El objetivo principal del presente estudio de investigación es el de Determinar la influencia que tiene la mejora de la gestión de mantenimiento del área de servicios en la confiabilidad de los tableros de control eléctrico dentro de las operaciones de una empresa minera. La identificación de las mejoras se logra implementando la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM II publicada a finales de los años de 1990 el cual nos muestra, como parte del análisis multidisciplinario, las mejores estrategias para reducir el impacto y consecuencias adversas como parte de la aparición de los modos de falla críticos (Fernandez, 2016).

Se han evaluado cinco modos de falla en los tableros de control eléctrico que son predominantes dentro de este análisis tales como: (1) Temperatura elevada de variador, (2) Falla del sistema de protección, (3) Desconfiguración del tablero, (4) Recalentamiento las llaves de fuerza y (5) Fallas en el núcleo del transformador de corriente. Para cada uno de estos modos de falla se ha realizado el cálculo del RPN (Risk Priority Number) en función de las condiciones de trabajo presentes y las formas que se tienen de poder advertir y controlar dichos modos de falla. Al presentar valores elevados desde 336 puntos hasta 120 puntos, fue posible definir acciones concretas que permitirán reducir dichos valores de RPN desde los 180 puntos hasta los 54 puntos, definiendo para ello áreas responsables y fechas propuestas de ejecución con la finalidad de que la administración de mantenimiento pueda realizar el seguimiento respectivo para su cumplimiento.

Como parte de los resultados, fue necesario realizar el levantamiento del proceso actual de la gestión de mantenimiento mostrado en la figura 2, donde se identificó a

los principales responsables de cada una de las actividades que se realizan como parte de los que haces diarios para el cuidado de los equipos. Si bien es cierto que el actual proceso cuenta con un sistema ordenado para el registro de la información, así como la definición clara de las funciones de cada parte involucrada y una secuencia sistematizada para el reporte y atención de fallas de los equipos, se pudo identificar oportunidades de mejora que permiten robustecer el mapa actual de procesos, siendo las mejoras propuestas: (1) La formación de un equipo de inspecciones permanentes, con lo que se mejora la detectabilidad de las fallas; (2) El involucramiento del personal de operaciones para el reporte directo de anomalías o fallas en progreso; (3) La generación y presentación de indicadores claves para el seguimiento estricto de la gestión de mantenimiento, alineado al precepto metodológico de que "Lo que no se mide, no se controla". De esta manera es posible mostrar gráficamente a todo el personal involucrado la secuencia de actividades y líneas de atención para optimizar la gestión actual de mantenimiento del área de servicios.

Durante la categorización de los modos de falla fue posible identificar que el 62% de las atenciones de mantenimiento están relacionadas a problemas eléctrico (Ver figura 16) lo que refuerza el enfoque del presente trabajo de investigación y las estrategias están correctamente enfocadas.

Es conocido, dentro del campo de acción de la gestión de mantenimiento industrial, que el incremento de la confiabilidad de los equipos permite contar con mayores horas de producción (incremento de confiabilidad), reducción de los costos operativos (debido a que los equipos fallan menos veces y no se necesitan mayores recursos para su atención), el aumento de los tiempos promedios de reparación MTBF y permite

realizar una planificación y programación más precisa sin mayores desviaciones (al reducir significativamente los mantenimientos correctivos) (García, 2017).

Por ello se realizó la comparación de los costos de mantenimiento durante los años 2018 y 2019 mostrando en ambos casos que se ha excedido en 8% y 16% respectivamente con relación al presupuesto definido por el área para cada año, este resultado es contraproducente debido a que significa que se requieren mayores recursos económicos para poder administrar el área de mantenimiento (ver tabla 5).

En cuanto al nivel de cumplimiento de los trabajos ejecutados durante al año 2019 se pudo determinar una relación del 63% para trabajos programados y un 37% para trabajos no programados, debiendo ser el objetivo deseado 70% / 30% (ver tabla 6). Se pudo apreciar también que esta proporción es variable a lo largo de los meses evaluados lo que indica que existe mucha variabilidad para controlar las actividades cotidianas para la atención de los equipos (ver figura 20).

También se analizó la capacidad de cumplimiento de los trabajos programados realizados por el área de ejecución durante el año 2019 presentando valores que oscilan entre el 65% y 95%, debiendo tener un objetivo del 95% (ver figura 21). La falta del cumplimiento de las tareas programadas se verá reflejado en el deterioro progresivo y oculto de las los elementos internos de los equipos, lo que a futuro impactará en la confiabilidad de los equipos (Arata & Funaletto, 2005).

Se realizó el cálculo de los tiempos promedios entre fallas – MTBF de los tableros de control eléctrico con información recopilada del año 2019, siendo el resultado de MTBF = 176 días de operación. No se tiene un objetivo específico para este valor

debido a que no se ha registrado anteriormente por lo que el resultado representará la línea base sobre el cual comparar el desempeño de los equipos, lo que se está claro es que un mayor resultado en este valor significará que el equipo trabaja mayor tiempo sin necesidad de atención por parte del área de mantenimiento (Felipe, 2017)

Se analizó también el porcentaje de los trabajos realizados en los tableros de control eléctrico durante los años 2018 y 2019 entando entre los valores de 60.32% y 61.74% (ver figura 22 y 23), lo que nos indica que la tendencia es constante y el problema predominante, siendo el objetivo el de reducir las intervenciones a estos equipos con la mejora de la gestión de mantenimiento.

Con la información de los tiempos promedios entre falla fue posible identificar el tipo de distribución que mejor modela los datos de falla de los tableros de control eléctrico para realizar el cálculo de la confiabilidad actual, cuyo tiempo esperado es de 200 días de operación.

Se determinó que los datos pertenecen a una distribución normal con un promedio de 175.92 días y una desviación estándar de 53.02 días, esto quiere decir que el tiempo de operación sin fallas de los tableros de control eléctrico se sitúa entre $< 122.9 - 228.9 >$ días de operación (ver tabla 9).

El cálculo de la confiabilidad se realizó para un tiempo estimado de operación de 200 días, este tiempo fue asumido en relación al tiempo promedio entre fallas obtenido como parte del análisis y para lograr un nivel de confiabilidad comparable con los futuros resultados que se puedan obtener como parte de la implementación de las mejoras propuestas (Tavares, 2016). El resultado actual del valor de confiabilidad es de 32.48%, lo que indica que, de 100 tableros eléctricos, 32 de ellos superará los 200

días de funcionamiento sin presentar fallas o intervenciones del área de mantenimiento.

La implementación de un programa de mantenimiento predictivo permite alcanzar el siguiente nivel en la escala de desarrollo de la gestión integral de mantenimiento (Sanchez, 2016). Para ello se propone utilizar la técnica de la termografía con la finalidad de identificar variaciones de temperatura antes que se produzca la falla de los componentes internos de los tableros de control eléctrico. Para ello es necesario contar con personal calificado y certificado en la técnica de termografía, así como el equipo de medición que permita recopilar los datos y analizarlos mediante tendencias.

Las figuras 28, 29 y 30; muestran la forma en la que puede aplicarse esta técnica y la facilidad con la que pueden obtenerse la información. Es importante desarrollar un procedimiento específico donde se detalle las zonas a medir para poder realizar comparaciones posteriores, definiendo para cada punto los niveles de advertencia (normal, precaución, crítico).

Dentro del análisis financiero evaluado en un periodo de 5 años, se determinó que el nivel de inversión comparado con los beneficios que se podrán obtener como parte de la implementación de las mejoras propuestas tienen como resultado un TIR = 46% y un VAN = \$ 204 917.00; esto significa que la propuesta es viable económicamente.

El TIR resultante es comparado con el WACC = 14% mostrando un valor superior, lo que significa que la tasa de interés resultante es mayor al esperado, lo que hace rentable la implementación del proyecto.

4.2 Conclusiones

De acuerdo a los objetivos propuestos, se concluye en lo siguiente:

1. Como parte del diagnóstico de la gestión del área de mantenimiento se pudo identificar que no se están realizando inspecciones previas a la planificación del programa de mantenimiento de los equipos, lo que representa un bajo nivel de detectabilidad de las fallas. Se ha identificado además que el personal de operaciones no cuenta con los mecanismos formales para reportar las fallas o anomalías presentadas en los equipos. Así mismo no se cuenta con un cuadro de indicadores que permitan evaluar semanalmente el desempeño de la gestión integral de mantenimiento para el área de servicios.
2. El valor de la confiabilidad para 200 días de operación de los tableros de control eléctrico es del 32.48%, el cual se encuentra muy por debajo del esperado que debería ser de al menos 65% lo que se traduce en desviaciones de costos de hasta el 16%, incumplimiento de los trabajos programados del 20% y altos niveles de trabajos no programados del 37%.
3. Como parte de las mejoras propuestas se ha definido lo siguiente:
 - 3.1. Implementar un programa de mantenimiento predictivo, soportado por la técnica de la termografía con la finalidad de advertir fallas en progreso.
 - 3.2. Re – diseñar el mapa de procesos para optimizar la atención de los equipos que administra el área de mantenimiento donde se incluya la participación del personal de inspecciones, el entrenamiento a los operadores para la configuración adecuada de los tableros de control eléctrico y la presentación periódica de los principales indicadores de gestión del área.

- 3.3. Modificar la estrategia de mantenimiento que incluya el cambio periódico de las partes que tienen mayor tasa de fallas mediante el análisis estadístico, seteo de los tiempos de inspección por acumulación de contaminantes en el interior de los tableros de control eléctrico, buscar alternativas para mejorar la calidad del producto e incrementar la vida útil de los elementos e implementación de telemetría para la configuración en línea de los principales parámetros de funcionamiento de los equipos de acuerdo a la necesidad operativa.
- 3.4. Se propone también implementar un tablero de control de indicadores (Dashboard) que muestre información actualizada de los principales indicadores de mantenimiento como son: (1) Confiabilidad de los equipos, (2) Tiempo medio entre fallas MTBF, (3) Nivel de trabajos programados, (4) Porcentaje de trabajos realizados, (5) Cumplimiento de trabajos programados, (6) Nivel del cumplimiento del presupuesto del área; con la finalidad de tomar acciones oportunas cuando sea necesario.
4. Desde el punto de vista financiero, se demuestra que el proyecto es viable al obtener un VAN de \$ 204 917.00 y un TIR de 46% comparado con el costo promedio ponderado del capital (WACC) de 14% dentro de un periodo de evaluación de 5 años de vida útil de la empresa minera, lo que permite al proyecto ser rentable con los beneficios adicionales del aumento de la disponibilidad operativa, reducción de costos operativos y el incremento de las horas de operación de los equipos analizados.

REFERENCIAS

- Arata, A., & Funaletto, L. (2005). *Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento*. Santiago de Chile: RIL Editores.
- Area de Innovación y Desarrollo. (2017). *Investigaciones Cualitativas en Ciencia y Tecnología*. Alzamora: Los autores.
- Boero, C. (2009). *Mantenimiento industrial*. Argentina: Jorge Sarmiento Editor.
- Campo, C. (2013). *Tipos de Costos de Mantenimiento*. 10.
- Campos, O., Tolentino, G., Toledo, M., & Tolentino, R. (2019). *Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Caterpillar INC. (2005). *Performance Metrics for Mobile Mining Equipment*. USA: Caterpillar.
- Diaz Fuentes, D., Hoyo Aparicio, A., & Marichal Salinas, C. (2017). *Orígenes de la globalización bancaria. Experiencias de España y América Latina*. España: Genuve Ediciones.
- Felipe, L. (18 de Octubre de 2017). *Confiabilidad Integral del Activo*. Obtenido de *Confiabilidad Integral del Activo*: <https://goo.gl/3E7hvp>
- Fernandez, E. (2018). *Gestión de Mantenimiento: Lean Maintenances y TPM*. Gijón: Universidad de Oviedo.
- Garcia, G. (2013). *Ingeniería de Mantenimiento, manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento industrial*. España: Renovotec.
- García, G. (2015). *La Reducción de Costes de Mantenimiento*. Madrid: Renovotec Ingeniería.
- García, O. (17 de Octubre de 2017). *Gestión Integral de Mantenimiento Basado en Confiabilidad*. Obtenido de *Gestión Integral de Mantenimiento Basado en Confiabilidad*: <https://goo.gl/7mdvpe>

- Garrido, S. G. (2016). *Organización y Gestión de Mantenimiento de Instalaciones*. Madrid: Renovetec.
- Gomez, A. M. (2017). *Técnicas de Mantenimiento Predictivo*. Bogotá: Universidad católica de Colombia.
- Hernández, J., & Vizán, A. (2013). *Lean Manufacturing, conceptos, técnicas e implantación*. Madrid: Fundación EOI.
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A.DE C.V.
- Jimenez, A. (09 de Abril de 2012). *Mantenimiento Latino Americano*. Obtenido de Costo del Ciclo de Vida de un Activo: <https://maintenancela.blogspot.com/2012/04/costo-del-ciclo-de-vida-de-un-activo.html>
- Jimenez, F., & Espinoza, C. (2007). *Costos industriales*. Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.
- Johnston, M. (11 de junio de 2018). *Como seleccionar la estrategia de mantenimiento adecuada*. Obtenido de *Reliabilityweb.com*: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/selecting-the-correct-maintenance-strategy>
- Lopera, J., Ramirez, C., Zuluaga, M., & Ortiz, J. (2010). *El Método Analítico como Método Natural*. *Revista crítica de ciencias sociales y jurídicas*, 27.
- Martin, D. (30 de Abril de 2017). *Estrategia Práctica*. Obtenido de *Matriz de Prioridades - Guía Práctica*: <https://www.estrategiapractica.com/matriz-prioridades-guia-practica/>
- Martinez, J., Rojas, C., & Tous, A. (2011). *Sensores de Resistencia Metálica RTD*. Barranquilla: Fundación Universidad del Norte.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. North Carolina: Edwards Brothers.
- O'Connor, P., & Kleyner, A. (2012). *Practical Reliability Engineering*. Gran Bretaña: Wiley.
- Osarenren, J. (2015). *Integrated Reliability: Condition Monitoring and Maintenance Equipment*. USA: CRC Press.

Pascual, R. (2008). El Arte de Mantener. Santiago: Universidad de Chile.

Perez, Rodriguez, & Sancho. (2007). Mantenimiento de Máquinas. España: Universidad Jaime I.

Pistarelli, A. (2010). Manual de Mantenimiento, Ingeniería, gestión y organización. Buenos Aires: RyC.

Reliabilityweb. (13 de Diciembre de 2017). Definición de las frecuencias para un plan de mantenimiento. Obtenido de Reliabilityweb A culture of Reliability: <https://goo.gl/gDGZhY>

Renovetec. (20 de 01 de 2016). RCM3. Obtenido de <http://rcm3.org/que-es-rcm>

SMRP. (2009). Maintenance and Reliability Body of Knowledge - Best Practice Metrics. Tennessee: SMRP.

Tavares, L. (2017). Administración Moderna de Mantenimiento. Rio de Janeiro: Novo Polo.

Torres, L. (2015). Gestión Integral de Activos Físicos y Mantenimiento. Córdoba: Marcombo S.A.

Watkins, S., & Orchiston, N. (2016). ISO 9001-2015 A pocket guide. Bran Bretaña: IT Governance Publishing.

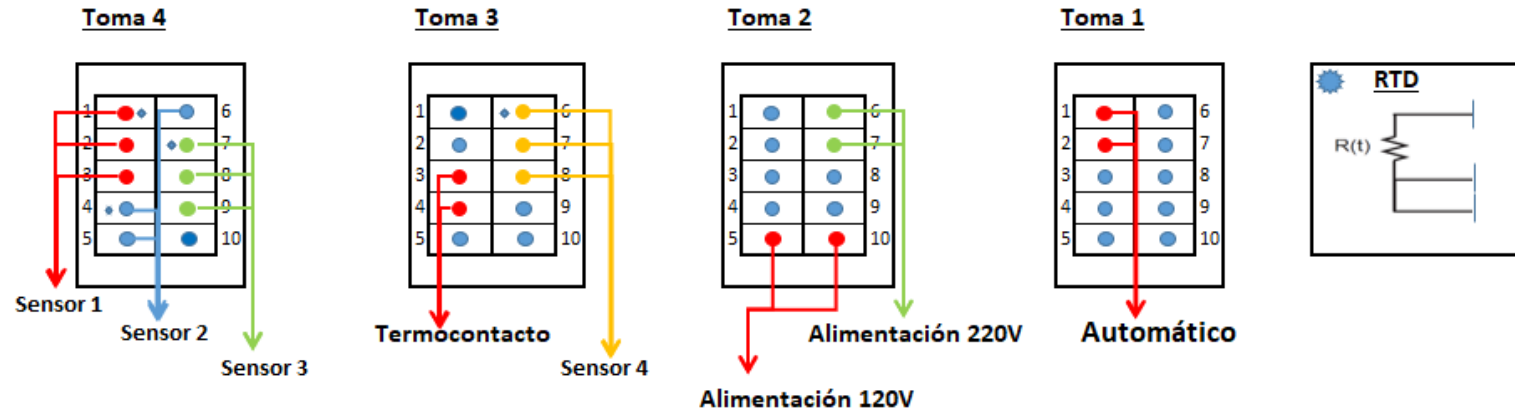
ANEXOS

Anexo 01: Extracto de base de datos para el análisis de información

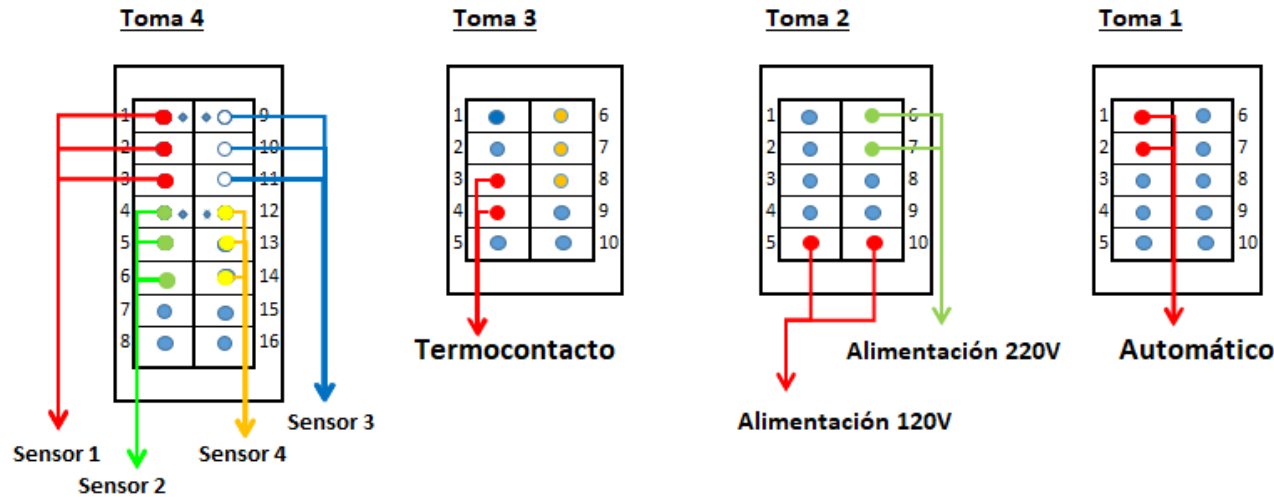
FECHA	Área	Especialidad	Descripción Estructura	FLOC estructura	WO	Trabajo	N° HORAS	TAR E	OBSERVACIONES	CAUSA	Lugar	Prueba
1-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Eléctrico	Poza Chino Dewatering	3000-20-60-30-PON3004	21401008	Apoyo a personal de MYSRL para apagar y encender equipos por bloqueo para trabajos en tuberías.	3	No Programado	Se realizó inspección trimestral de herramientas manuales y equipos.			
1-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Eléctrico	Pumping System	-	-	Verificación de sistema, se encontró tanque 6 con fuga. Se modificó la programación del transmisor de nivel para el apagado de su relé se cambió de 60% a 65%. La bomba turbina pos 06 del tablero TAB-149 quedó operativa con 55Hz y 320Amp.	2	No Programado	Se nota que la geomembrana dentro del tanque se encuentra inflada lo que genera errores en la lectura del transmisor de nivel para valores menores a 63%. Eso puede causar que la bomba trabaje con niveles bajos de agua. Se cambió el valor de apagado a 65% para minimizar la posibilidad de falla del transmisor.	Tablero	Campo	automatico
1-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Eléctrico	Poza Sump Chaquicocha	3000-20-60-10-PON1002	21401010	Se realizó desconexión de tablero TAB-152 y se conectó el tablero TAB-177. Se conectó la electrobomba Flyght posición 5 quedando operativa con 139Amp Se conectó el generador GNDP007 400Hp 299KW al tablero TAB-104 con 35mts de cable AL-240mm2 Se conectó el tablero TAB-146 con doble terna 250MCM del transformador T-8067 breaker 2.	2	No Programado	El tablero TAB-152 tiene 450Arranques, 4d 17h 19m El tablero TAB-177 tiene 926Arranques, 0d 14h 34m La bomb turbina quedó operativa con 53Hz y 290Amp.	Tablero	Campo	Cambio
1-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Eléctrico	Poza Sump Chaquicocha	3000-20-60-10-PON1002	21401012	Verificación de falla en tablero TAB-104, la electrobomba FLYgh en un sentido consume 150Amp pero luego la corriente disminuye hasta 60Amp. En el otro sentido la bomba consume 400Amp.	2	No Programado	La electrobomba Flyght quedó desconectada y tiene un megado de 400Mohm, bobinas ok, 1 RTD y 1 termo contacto operativos.	Tablero	Campo	motor
1-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Mecánico	Pumping System	-	-	Ajuste de estopas de la bomba del tanque 6, se ajustó 1 vuelta completa. Se ajustó manguera de refrigeración ya que se encontró fuera de la campana.	2	STO PA	La bocina presenta desgaste, en caso vuelva a haber fuga se deberá cambiar la caja completa			
1-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Mecánico	Poza UnderGround	3000-20-60-10-PON1006	21401014	Se requería realizar ajuste de espárragos en bomba turbina posición 2. No se hizo por trabajos pendientes en Sump Chaquicocha.	1	No Programado				
1-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Mecánico	Poza Sump Chaquicocha	3000-20-60-10-PON1002	21401015	Se verificó funcionamiento de electrobomba Flyght, en un sentido la manguera infla ya la bomba presenta sonido extraño, al cabo de unos 30 segundos la manguera se desinfla casi por completo. En el otro sentido la manguera no infla ni se percibe ningún sonido de funcionamiento.	2	No Programado	Se requiere verificar strainer de electrobomba Flyght para descartar completamente la falla mecánica.			
2-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Eléctrico	TR HuaynaPicchu	3000-20-60-10-TAN1001	21401016	Monitoreo programado de temperaturas RTD de motores en tableros eléctricos. Se encontraron 5 bombas operativas	2	No Programado	Se tomaron solo 2 lecturas debido a actividades	Tablero	Campo	Monitoreo
2-Ene	Drenaje Mina	Mantenimiento Eléctrico	Pumping System	-	-	Se requería apoyar a personal de MYSRL para bloqueo de energía, no se realizó la actividad. Se inspeccionaron visualmente los transformadores T-8160 y 147754-T2.	2	No Programado	El transformador 147754-T2 es nuevo y tiene elastimold para su armado, se llevaron y dejaron en talleres YN (CEYCA). El T-8169 no es nuevo. Se recomienda realizar en ambos protocolos de pruebas de transformadores.			

Anexo 02: Modelo para la configuración de los sensores de los tableros de control eléctrico

Modelo 1



Modelo 2



Anexo 03: Modelos de Check list para inspección de tableros de control eléctrico

CHECKLIST TABLERO ELECTRICO		Ver. 01																		
		1/12/2019																		
Datos Tablero Electrico																				
Marca		Codigo																		
Modelo		N° Serie																		
Potencia		Estructura de Origen																		
Pruebas Electricas en Vacio (Multitester-Ohmmimetro)																				
Tiristores Diodos Breaker Principal Breaker Secundario	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Valores</td><td style="width: 50%;"></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> </table>	Valores		Valores		Valores		Valores		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;"> Fusibles Reactancias Bus DC con carga Pruebas con carga Motor 20HP </td><td style="width: 50%;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Valores</td><td style="width: 50%;"></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> </table> </td></tr> </table>	Fusibles Reactancias Bus DC con carga Pruebas con carga Motor 20HP	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Valores</td><td style="width: 50%;"></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> </table>	Valores		Valores		Valores		Valores	
Valores																				
Valores																				
Valores																				
Valores																				
Fusibles Reactancias Bus DC con carga Pruebas con carga Motor 20HP	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Valores</td><td style="width: 50%;"></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> <tr><td>Valores</td><td></td></tr> </table>	Valores		Valores		Valores		Valores												
Valores																				
Valores																				
Valores																				
Valores																				
Verificacion Estado y Operatividad																				
Fusibles SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Modulo RTD SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Panel de Control SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Conectores Rapidos SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Breaker Principal SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Manija de Breaker SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Toma a tierra SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Tarjeta de Control SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Selector SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Tarjeta de Potencia SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Filtros DV/DT SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Vigirex SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>	Baliza Azul SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Botonera SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Sirena SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Techo SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Manija de puertas SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Puertas SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Patin SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Perneria (Faltantes) SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> Ajuste de pernos (Marcados) SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/>																			
Tecnico Electricista Responsable: Nombre: _____ Fecha: _____ Firma: _____																				
Observaciones: 																				

Anexo 04: Modelo de registro de datos de termografía

INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA DE TABLEROS 4.16 KV / 0.48 KV				
REBOMBEO TR3				
TAB-203 Arrancador - 150 HP	TEMPERATURA °C			AMPERAJE (Amp.)
	Alimentación	Salida a Motor	Del Variador	Alimentación
R	22.7	25.6	-	103.9
S	22.9	25.4	-	103.3
T	22.9	24.9	-	104.6
DESFASE ENTRE R-S	-0.2	0.2	N/A	0.6
DESFASE ENTRE R-T	-0.2	0.7	N/A	-0.7
DESFASE ENTRE S-T	0	0.5	N/A	-1.3
TAB-204 Arrancador - 150 HP	TEMPERATURA °C			AMPERAJE (Amp.)
	Alimentación	Salida a Motor	Del Variador	Alimentación
R	38.9	40.3	-	139.4
S	38.8	33	-	140.2
T	38.5	36.8	-	141.2
DESFASE ENTRE R-S	0.1	7.3	N/A	-0.8
DESFASE ENTRE R-T	0.4	3.5	N/A	-1.8
DESFASE ENTRE S-T	0.3	-3.8	N/A	-1
TAB-205 Arrancador - 150 HP	TEMPERATURA °C			AMPERAJE (Amp.)
	Alimentación	Salida a Motor	Del Variador	Alimentación
R	26.3	30.8	-	133.4
S	26.8	42.6	-	133
T	27.2	28.9	-	132.1
DESFASE ENTRE R-S	-0.5	-11.8	N/A	0.4
DESFASE ENTRE R-T	-0.9	1.9	N/A	1.3
DESFASE ENTRE S-T	-0.4	13.7	N/A	0.9
TAB-206 Arrancador - 150 HP	TEMPERATURA °C			AMPERAJE (Amp.)
	Alimentación	Salida a Motor	Del Variador	Alimentación
R	24.7	31	-	131.4
S	25.7	31.8	-	132.6
T	25.9	31.2	-	133.6
DESFASE ENTRE R-S	-1	-0.8	N/A	-1.2
DESFASE ENTRE R-T	-1.2	-0.2	N/A	-2.2
DESFASE ENTRE S-T	-0.2	0.6	N/A	-1

Anexo 05: Registro fotográfico de tableros de control eléctrico

