

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM2 EN EL PROCESO DE MANTENIMIENTO, PARA INCREMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE LA ESTACIÓN DE BOMBAS GEHO EN UNA EMPRESA MINERA DEL DEPARTAMENTO DE JUNÍN”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Industrial

Autor:

Lucio Fernando Calla Torres

Asesor:

Ing. Mg. Frank Alberto Tello Legoas

Cajamarca - Perú

2020



DEDICATORIA

¡Se los dedico a todos!

Sobre todo, a esos seres de luz que hacen que mis días sean maravillosos, con sus amplias sonrisas, sus enseñanzas, impulsos de amor que me proyectan día a día, gracias Fernando y Luciana por demostrarme siempre que todo esfuerzo vale la pena y alegrar mi existencia. Gracias a mi esposa Carmen por ser cómplice, confidente y amiga, por ayudarme a crecer, por amarme, por ser tan tú, pero, sobre todo, gracias por nunca cortarme las alas. Gracias a ti mamá Graciela por los valores inculcados por hacerme buen padre y esposo. Mi corazón les pertenece.

Los amo

AGRADECIMIENTO

Quiero manifestar mi agradecimiento a las personas que hicieron posible la presente investigación y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, agradezco también sus enseñanzas, y experiencia compartida ya que con ellas me desenvuelvo por el mundo.

Tabla de contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	8
LISTA DE ABREVIATURAS	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad problemática	11
1.2. Formulación del problema.....	15
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. Hipótesis.....	16
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	17
2.1. Tipo de investigación.....	17
2.2. Materiales, instrumentos y métodos	17
2.2.1. Materiales.....	17
2.2.2. Técnica e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	18
2.2.3. Métodos	18
2.3. Procedimiento.....	29
2.3.1. Coordinaciones en la zona de estudio	29
2.3.2. Toma de datos	29
2.3.3. Análisis de la información	29
2.4. Matriz de consistencia	31
2.5. Operacionalización de variables	32
CAPÍTULO III. RESULTADOS	34
3.1. Diagnóstico de la situación actual de la empresa.....	34
3.1.1. Organigrama del área de mantenimiento	36
3.1.2. Resultados del análisis de la disponibilidad mecánica en la situación actual.....	37
3.1.3. Indicadores de gestión de mantenimiento en la situación actual	44
3.2. Implementación RCM2	47
3.2.1. Contexto operacional bomba Geho	47
3.2.2. Contexto del sistema de bombeo.....	51
3.2.3. Desarrollo del RCM2.....	54
3.2.4. Resultados del análisis de la disponibilidad mecánica luego de la implementación de RCM2	74

3.2.5.	Indicadores de gestión de mantenimiento luego de la implementación RCM2	75
3.3.	Análisis de viabilidad económica de la implementación de RCM2	78
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES		84
4.1	Discusión	84
4.2	Conclusiones.....	85
REFERENCIAS.....		87
ANEXOS		89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Técnicas e Instrumentos de Recolección y Análisis de Datos	18
Tabla 2 Diagrama de decisión del RCM2. Ejemplo	28
Tabla 3 Operacionalización de la Variable Independiente	32
Tabla 4 Operacionalización de la Variable Dependiente	33
Tabla 5 Disponibilidad de la Estación de Bombas GEHO 2019 Situación Actual	38
Tabla 6 Cuadro Resumen de Fallas Presentadas en la Estación de Bomba GEHO	40
Tabla 7 Porcentaje de Tareas Preventivas, Predictivas y Correctivas Realizadas	44
Tabla 8 Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Correctivas Situación Actual	46
Tabla 9 Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Predictivas Situación Actual	46
Tabla 10 AMFE Unidad de Líquido propelente	54
Tabla 11 Hoja de Decisión Unidad de Líquido propelente	56
Tabla 12 AMFE Unidad de Regulación de Límite de Presión	58
Tabla 13 Hoja de decisión RCM2 Unidad de Regulación de Límite de Presión	58
Tabla 14 AMFE Unidad Power End	59
Tabla 15 Hoja de decisión RCM2 Unidad Power End	60
Tabla 16 AMFE Unidad de Lubricación Power End	61
Tabla 17 Hoja de Decisión RCM2 Unidad de Lubricación Power End	62
Tabla 18 AMFE Unidad Alojamiento de Diafragma	63
Tabla 19 Hoja de Decisión RCM2 Unidad Alojamiento de Diafragma	64
Tabla 20 AMFE Unidad de Válvula Cónica	65
Tabla 21 Hoja de decisión RCM2 Unidad de Válvula Cónica	66
Tabla 22 AMFE Unidad Dampener	67
Tabla 23 Hoja de Decisión RCM2 Unidad Dampener	68
Tabla 24 AMFE Unidad de Llenado de Dampener	69
Tabla 25 Hoja de Decisión RCM2 Unidad de Llenado de Dampener	69
Tabla 26 AMFE Manifold y Tuberías de Transporte Alta Presión	70
Tabla 27 Hoja de decisión RCM2 Manifold y Tuberías de Transporte Alta Presión	71
Tabla 28 AMFE Cimentación y Anclaje	71
Tabla 29 Hoja de decisión RCM2 Cimentación y Anclaje	72
Tabla 30 Tabla Resumen de estrategias a implementar	73
Tabla 31 Disponibilidad de la Estación de Bombas GEHO 2019 Luego de la Implementación del RCM2	75
Tabla 32 Porcentaje de Tareas Preventivas, Predictivas y Correctivas Realizadas Implementado RCM	76
Tabla 33 Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Correctivas y Preventivas Implementando RCM	77
Tabla 34 Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Predictivas Implementando RCM	78
Tabla 35 Tabla CAPEX Costos de Capital	79
Tabla 36 Datos para Cálculo de Inversión	80
Tabla 37 Cálculo ROI Retorno de la Inversión	80
Tabla 38 Estructura de Costos	81
Tabla 39 Costo Evitado de Mantenimiento Implementando RCM2	82
Tabla 40 Valor Actual Neto de Proyecto de Inversión	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Metodología estructurada de acuerdo a métodos	19
Figura 2 Gráfico de Pareto	21
Figura 3 Modelo Diagrama de Ishikawa	22
Figura 4 Trabajo de Mantenimiento Actual y Objetivo por Origen	24
Figura 5 Fases de la Implementación del RCM	25
Figura 6 Las 7 Preguntas del RCM2	26
Figura 7 Flujo Lógico del Diagrama de Decisión RCM II.....	27
Figura 8 Organigrama del Área de Mantenimiento de la (EM)	36
Figura 9 Disponibilidad de la Estación de Bombas GEHO 2019.....	38
Figura 10 Pareto de Fallas Presentadas en la Estación de Bombas GEHO	41
Figura 11 Diagrama Causa – Efecto “Falla Funcional de la Bomba Geho”	43
Figura 12 Data Sheet B Equipment Specification.....	48

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	20
Ecuación 2.....	20
Ecuación 3.....	21
Ecuación 4.....	23
Ecuación 5.....	23
Ecuación 6.....	23
Ecuación 7.....	45
Ecuación 8.....	45
Ecuación 9.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS

RCM2: Reliability Centered Maintenance, proceso para determinar las necesidades del mantenimiento de los activos físicos en su contexto operacional, establece de manera sistemática las estrategias de mantenimiento para equipos, sistemas y activos.

MTBF: Mean Time Between Failures, representa el promedio del tiempo que transcurre entre dos averías en un mismo equipo.

MTTR: Mean Time To Repair, representa el promedio del tiempo necesario para reparar una avería.

MEM: Ministerio de energía y minas

CM: Compañía minera

t: Tonelada

h: Horas

m³/h: Metros cúbicos por hora

kPa: Kilo Pascal

Km: Kilómetro

ERP: Enterprise Resource Planning, es un conjunto de sistemas de información que permite la integración de ciertas operaciones de una empresa.

N₂: Nitrógeno.

°C: Grados Celcius.

CAPEX: Capital Expenditure, es el gasto que una empresa realiza en bienes de equipo.

AMFE: Análisis de modos de falla y efectos.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo elaborar una metodología eficiente de mantenimiento para la estación de bombas GEHO de relaves, la cual se enfoca en disminuir la ocurrencia de fallas que afectan la operatividad de la estación, la seguridad de los trabajadores y el medio ambiente.

El diagnóstico de la situación actual determina que existe una baja disponibilidad de la estación de bombas GEHO, debido a las fallas imprevistas o trabajos correctivos, que influye indirectamente con el mineral procesado por la planta ya que se encuentra a manera de una línea de producción.

La metodología aplicada es la del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM2, una vez implementada, busca incrementar la disponibilidad de la estación. La metodología se encuentra basada en las siete preguntas sobre el activo estudiado, que constituyen la elaboración de los AMFE y los diagramas de decisión del RMC2.

Los logros obtenidos con la implementación del RCM2 son cuantificados, implementados y orientados en reforzar las estrategias o planes de mantenimiento, así como entregar diferentes actividades de inspección a los operadores, que con su visión y contacto con el equipo ayudaran a mantenernos operativos.

Palabras clave: Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, estación de bombas GEHO, incrementar la disponibilidad.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En el estudio realizado por Zavala (2018), en su tesis denominada “Plan de mantenimiento preventivo basado en RCM para el Chancador Primario Fuller, operación Manto Verde” argumenta en su investigación, que el desarrollo de las tareas de mantenimiento mediante la metodología RCM se enfoca en aplicar tareas de mantenimiento según sean las causas de la indisponibilidad en el sistema, de esta manera se realizan sólo actividades necesarias para que el activo siga cumpliendo las funciones, por otro lado esta metodología es también puede implementada en chancadoras primarias de la localidad de Atacama.

Godínez (2015) en su investigación “Diseño de un programa de mantenimiento preventivo basado en RCM para los equipos de bombeo de off site” demuestra que con la implementación del RCM en la refinería costarricense RECOPE, logró elevar la disponibilidad desde 67.26% hasta 92.72% desarrollando fichas técnicas para los equipos críticos, además de un plan de mantenimiento preventivo con detalle en las inspecciones a ser desarrolladas por el personal de mantenimiento.

Como resultado de la investigación realizada aplicando el RCM Montes (2018) realiza una lista de requerimientos e instructivos siendo implementados en los correspondientes mantenimientos preventivos de la flota de vehículos, logrando así mejorar la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos en su investigación titulada “Diseño de un plan de mantenimiento para la flota articulada de integra s.a. usando algunas herramientas del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)” además resalta la posibilidad de reducir las actividades de mantenimiento preventivo desde un 40% a 70%.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad es una técnica de gran utilidad que puede ser utilizado para la creación de planes de mantenimiento en las plantas

industriales, sector energético y todo tipo de maquinaria que genere un trabajo. El RCM ha sido utilizado para crear estrategias de gestión de activos fijos ya que provee de información necesaria para tomar acciones en pro de conservar la funcionalidad de los activos, que en este caso fue aplicado a los transformadores de potencia.

Díaz; Cruz (2019) en su investigación denominada “Propuesta de guía metodológica para la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en transformadores de potencia” se ve reflejada la reducción de actividades de mantenimiento preventivo a un 80%, debido al incremento de actividades de mantenimiento predictivo, por otro lado, incrementa la disponibilidad para sostener una operación más continua en la distribución hacia la red eléctrica

La propuesta de Castillo (2017) referida a la implementación de un plan de RCM determina que su aplicación mejorará la tasa de fallos de 0.00142 a 0.0006, es decir de un MTBF de 29 a 69 días representando un 57.95%. Esto representa evitar la pérdida de 3602 barriles de petróleo en su estudio denominado “Propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad de las unidades de bombeo horizontal multietapas del sistema power oil de la estación Atacapi del B57-li de Petroamazonas EP”.

La implementación de la metodología de RCM logró llevar a los trenes de fuerza de 12,000 horas de vida útil a 16000 horas de vida. Así mismo los costos promedio de reparación se redujeron en un 23.1% luego de iniciado el proyecto es lo que propone Robles (2018) En su tesis denominada “Diseño de un plan de mantenimiento basado en RCM para incrementar la vida útil del tren de fuerza de camiones de acarreo marca Caterpillar modelo 793D en Sociedad Minera Cerro Verde”.

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) con la aplicación estructurada de la metodología RCM logó beneficios como el aumento de su producción en 14% logrando un impacto entre \$ 600 mil y un millón \$ anuales, reducción de costos de

mantenimiento identificados entre 170 a 310 K \$/año, también se eliminó una de las 2 paradas de mantenimiento semanales de 4 horas es lo que nos sustenta Yengle (2016) en su trabajo de investigación.

Vilca (2018) En su tesis denominada “Propuesta de implementación de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM para la mejora de la disponibilidad de los equipos del sistema de carga y transporte en una empresa minera, lima 2018” proyecta una reducción significativa en el índice de gastos incurridos en mantenimiento que bordea el 24.82% realizando la implementación del plan de mantenimiento; de igual manera esto repercute en la disponibilidad incrementándola desde 89.2% en el año 2016 a 92% para el año 2018.

Salazar (2018) en estudio denominado “Implementación del RCM para mejorar la disponibilidad de la bomba geho TZPM 400 en unidad operativa Selene” desarrolló el plan de actividades a realizar para mejorar la disponibilidad, consiguientemente también detalla que puestos de trabajo lo deben ejecutar; teniendo en cuenta el cálculo de disponibilidad antes y después de la implementación del RCM, esta se logrando mejorar de 86.96% a 92.4%.

Reynoso (2015) En su tesis denominada “Aplicación de metodología de RCM para el incremento de disponibilidad de chancadora HP-500 en la Compañía Minera Volcan-Chungar” concluye que con el uso de la metodología del RCM optimiza el incremento de disponibilidad mecánica de la chancadora HP-500 de 88.13 % a 95.38 %, incrementando el tiempo en horas disponibles de chancadora. Para ello es trascendente realizar un buen planeamiento, así como mantenimiento oportuno.

En la EM (Empresa minera) la estación de bombas GEHO es la encargada de trasladar el relave desde el punto de bombeo de la planta, hacia las diferentes ubicaciones de los

spigots donde se inicia su disposición final del relave para la posterior recuperación del agua.

Una modificación necesaria en la línea de descarga ha sido implementada, obedeciendo al crecimiento de la presa de relaves (contemplado en la ingeniería de desarrollo a largo plazo), lo que motivó que el trazo o ubicación de la línea de descarga se haya modificado, cambiando los parámetros operativos de las bombas GEHO, operando con mayores presiones de trabajo, pero dentro de los parámetros de diseño de las mismas. La variación de parámetros operativos impactó en la disponibilidad de la estación de bombas GEHO, ya que se evidenciaron diferentes modos de falla nuevos sumados a los ya existentes, ocasionando detenciones no programadas de los equipos, compras de repuestos de emergencia, contrataciones de servicios especializados, para atender las fallas en los equipos, etc.

La disminución de la disponibilidad de los equipos del sistema de bombeo fue calculada en 88.9%, puede impactar en la producción de la planta considerando el respectivo KPI de mineral molido actual 117,000 toneladas. Existe la necesidad de incrementar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO haciendo uso de la metodología RMC2 para garantizar una disponibilidad mecánica de 95%, para disminuir las fallas en los equipos.

Durante el Ejercicio 2019 donde el Budget de producción fue estimado con 205,073 toneladas de Cu fino producido en el año, el resultado obtenido de mineral producido fue 207,718 toneladas de CU fino.

El cumplimiento del plan no se debió a un incremento del Throughput de mineral molido, sino a un incremento no esperado de la ley de Cu durante el proceso de minado, el cual contribuyó con el cumplimiento del plan productivo.

Cualquier variación en la disponibilidad de los equipos denominados críticos pudo haber influido desfavorablemente en el resultado final de producción, por ello el departamento de mantenimiento ha decidido aplicar la metodología de RCM2 para incrementar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO de la (EM).

La estación de bombas GEHO consta de 10 bombas modelos TZPM 2000 conectadas en la descarga y succión en paralelo, cada motor de la bomba es de 2610 kW, la presión de descarga oscila entre 4800 kPa y 6000 kPa dependiendo de la concentración del relave (las cuales oscilan entre 59% y 62% de sólidos) y del punto de descarga en la presa (cotas más altas o bajas).

1.2. Formulación del problema

¿En qué medida se incrementará la disponibilidad de la estación de bombas GEHO en una empresa minera en el departamento de Junín mediante la implementación del RCM2 en el proceso de mantenimiento?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Elaborar la propuesta de implementación de RCM2 en el proceso de mantenimiento, para incrementar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO en una empresa minera del departamento de Junín.

1.3.2. Objetivos específicos

Realizar el diagnóstico de la situación actual de la estación de bombas GEHO, midiendo los indicadores de disponibilidad de los equipos.

Diseñar las estrategias de RCM2 en base al análisis de modos y efectos de fallas de la estación de bombas GEHO, diseñando actividades preventivas, predictivas y correctivas.

Calcular los nuevos valores de los indicadores al implementar el RCM2 a la estación de bombas GEHO.

Realizar el análisis de viabilidad económica de la implementación de RMC2.

1.4. Hipótesis

Al implementar el RCM2 en el proceso de mantenimiento, se logrará aumentar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO en una empresa minera del departamento de Junín.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación es explicativa, puesto que está orientada a dar respuesta sobre las causas de los eventos, acontecimientos o fenómenos ya sean de carácter físico o social. Dado caso se enfoca en explicar el por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta además de esclarecer por qué se relacionan dos o más variables (Hernández; Fernandez; Baptista, 2014, p.78).

La investigación es de tipo no experimental se realiza sin manipular intencionalmente las variables independientes para obtener efectos sobre la variable dependiente, es decir se desarrolla en un contexto natural.

La investigación desarrollada, cumple con las características proyectadas por el autor, es de enfoque cuantitativo, alcance explicativo, de diseño no experimental y propósito aplicada.

2.2. Materiales, instrumentos y métodos

2.2.1. Materiales

Los materiales a utilizar para el desarrollo del presente trabajo de investigación se detallan a continuación:

- Laptop.
- Impresora.
- Escritorio.
- Silla de oficina.
- Útiles de escritorio.
- Memoria de almacenamiento externo USB.

- Papel bond tamaño A4.
- ERP SAP módulo de mantenimiento.
- EPP específico para ingreso a planta casco, lentes y botas de seguridad.
- Pizarra.
- Proyector.

2.2.2. Técnica e instrumentos de recolección y análisis de datos

Tabla 1

Técnicas e Instrumentos de Recolección y Análisis de Datos

Objetivo específico	Técnica	Instrumento	Aplicado en:
Realizar el diagnóstico de la situación actual de la estación de bombas GEHO, midiendo los indicadores de disponibilidad de cada uno de los equipos.	Análisis documental	Ficha de registro de datos	En el área de mantenimiento y planificación, sistema de gestión de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia

2.2.3. Métodos

El presente trabajo de investigación reúne las condiciones metodológicas de la investigación aplicada ya que está fundada en conocimientos teórico-prácticos, estos son aplicados utilizando la metodología del RCM2 para realizar la evaluación de los modos y efectos de las fallas en el proceso de bombeo de relaves, el cual se ve afectado por la baja disponibilidad.

La investigación es de alcance explicativo, ya que se centra en esclarecer por qué ocurren los acontecimientos (fallas), recogeremos los datos de los eventos acontecidos en campo, para posteriormente analizarlos con el equipo multi-disciplinario conformado para el análisis, según el diagrama mostrado a continuación.

Como resultado del análisis obtendremos las acciones, planes de mantenimiento y reingeniería con el fin de garantizar el incremento de la disponibilidad de la estación de bombas y reducir los gastos de mantenimiento asociados a las fallas.

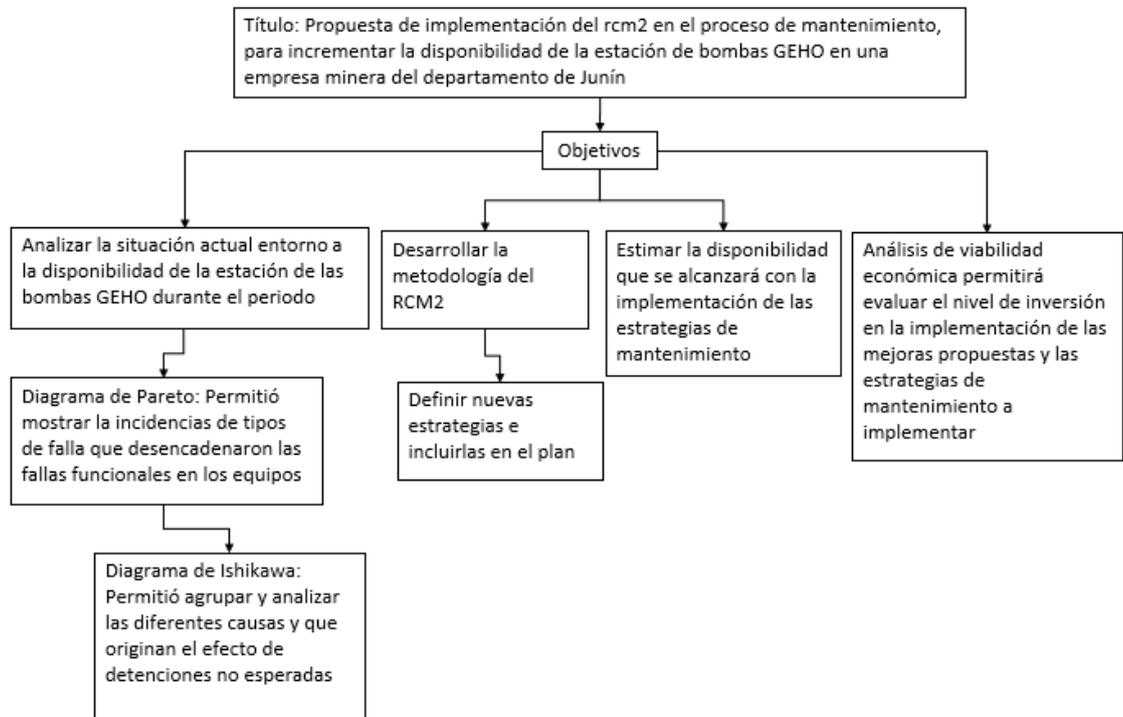


Figura 1 Metodología estructurada de acuerdo a métodos

Diagnóstico de la situación actual

Indicadores operacionales actuales: Se midió los indicadores operacionales actuales de la estación de bombas GEHO los cuales son la disponibilidad mecánica, MTBF y MTTR; el alcance de la investigación definió medir estos indicadores ya que son los más importantes y significativos para el análisis de la condición del mantenimiento. Mesa; Pinzón (2006), seguidamente se explica cada uno de ellos.

- **Disponibilidad mecánica:** Se realiza la medición de la disponibilidad mecánica del equipo utilizando los datos ingresados en el ERP SAP donde se puede separar eventos atendidos de manera correctiva, ya que, en él, se carga información como horas hombre,

duración de la reparación, repuestos requeridos, servicios contratados y algunas conclusiones de los trabajos realizados.

- La fórmula para realizar el cálculo de la disponibilidad de la estación, se muestra en la ecuación 1, para el cálculo, se obtendrá el promedio anual por equipo, considerar que la gerencia ha establecido una disponibilidad para el año 2020 de 95%.

Disponibilidad relacionada al MTBF y al MTTR

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \text{Ecuación 1}$$

- **MTBF:** Es el tiempo promedio que es capaz de operar un equipo, instalación o dispositivo a una capacidad requerida sin interrupciones dentro de un periodo de tiempo. La fórmula para calcular este indicador se muestra en la ecuación 2.

Cálculo de MTBF tiempo medio entre fallas

$$MTBF = \frac{\text{Hora Operadas}}{\text{Nº de Fallas}} \quad \text{Ecuación 2}$$

- **MTTR:** Es el tiempo promedio en el que un equipo, instalación o dispositivo puede ser reparado, desde que el equipo falló, hasta que el equipo es nuevamente puesto en servicio. La fórmula para este indicador viene representada en la ecuación 3.

Cálculo de MTTR tiempo medio entre reparaciones

$$MTTR = \frac{\text{Horas de Fallas}}{\text{Nº de fallas}}$$

Ecuación 3

- **Diagrama de Pareto:** El Diagrama de Pareto es una gráfica en donde se ordena diversas clasificaciones de datos por orden descendente, de izquierda a derecha por medio de barras simples después de haber reunido los datos para calificar las causas. De modo que se pueda fijar un orden de prioridades, es lo que concluye Sales (2013).

Su uso en el caso de estudio se basa en la priorización de los tipos de falla caracterizados, de tal manera que nos orientaremos en los casos más críticos que desencadenaron mayor tiempo de reparación y mayor recurrencia para evaluar los modos y efectos de las fallas, orientándonos para la búsqueda de estrategias que nos lleven a incrementar la disponibilidad.

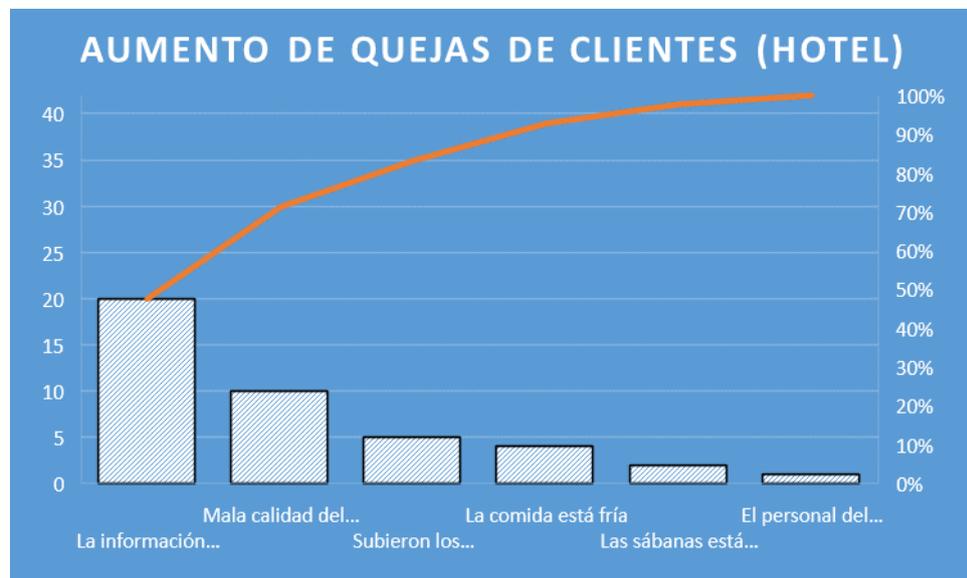


Figura 2 Gráfico de Pareto

Fuente elaboración propia

- **Diagrama de Ishikawa:** El diagrama causa-efecto es un instrumento apropiado para identificar y organizar las causas conocidas, que originan problemas asociados con la mala o pobre calidad. La estructura proporcionada por el diagrama ayuda a los integrantes del equipo conformado a pensar de modo sistemático. Este diagrama de causa-efecto identifica, ordena y muestra las posibles causas de un problema específico, proporciona un esquema gráfico de la correlación entre la salida esperada y todos los factores que afectan esta salida. (Stefanovic, et. al. 2014).

En nuestra investigación con el uso del diagrama se diferencié 8 ramas que originan las fallas funcionales de la bomba GEHO, con el resultado de este análisis se evaluarán los sistemas que serán propuestas para la implementación del RCM2 de la estación de bombas GEHO.

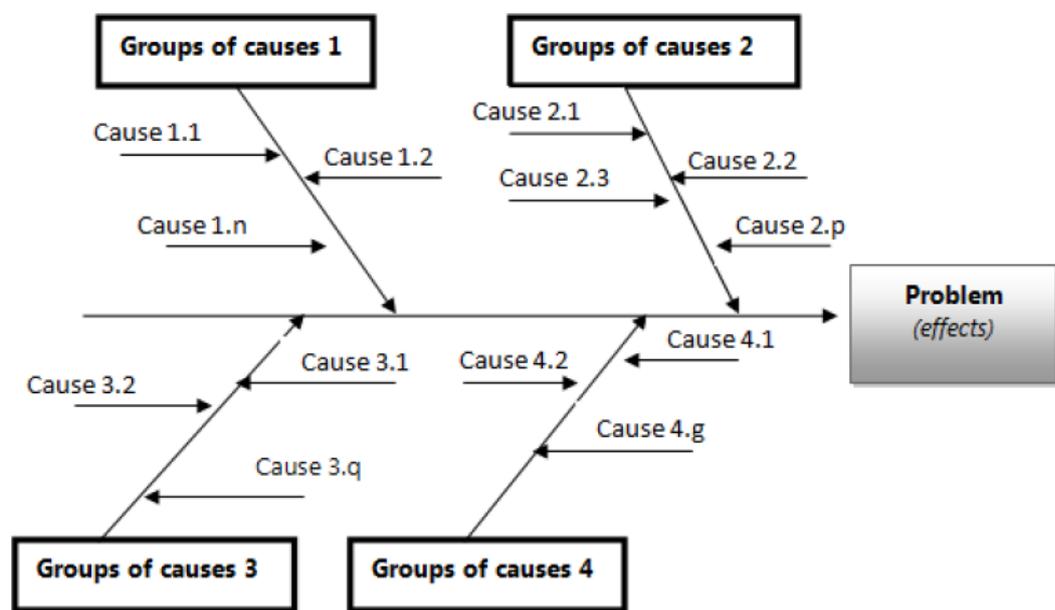


Figura 3 Modelo Diagrama de Ishikawa

Fuente: Recuperado de "Analysis of technological process of cutting logs using Ishikawa Diagram" Stefanovic, S., Kiss, I., Stanojevic, D., & Janjic, N. (Octubre de 2014).. *Ata Tehnica Corviniensis*, VII(2067-3809), 98.

Indicadores de gestión de mantenimiento: Como sabemos los indicadores de mantenimiento son ampliamente utilizados para realizar el análisis de los factores que interrelacionan con las diferentes funciones del mantenimiento, nos permite identificar las causas de las fallas de los equipos, así como el rendimiento de la mano de obra y de los recursos que intervienen; orientado a mejorar los planes de inspecciones, reparaciones, etc. Los indicadores que evaluaremos servirán para conocer cuál es porcentaje de tareas que se realizan en la estación de bombas GEHO pudiendo dividir las en mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo y mantenimiento correctivo, además se podrá medir cuanto es el porcentaje de horas trabajadas en cada tipo de mantenimiento, pudiéndose determinar si se requiere o no la incorporación de personal. Se debe considerar que el equipo de mantenimiento también se encarga del mantenimiento de otros equipos de la planta como el sistema de aguas, y el sistema de filtrado de concentrado.

% Tareas preventivas realizadas en relación al total de tareas realizadas

$$= \frac{\# \text{ de tareas preventivas realizadas}}{\# \text{ total tareas realizadas}} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

% Tareas predictivas realizadas en relación al total de tareas realizadas

$$= \frac{\# \text{ de tareas predictivas realizadas}}{\# \text{ total tareas realizadas}} \times 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

% Tareas correctivas realizadas en relación al total de tareas realizadas

$$= \frac{\# \text{ de OT correctivas realizadas}}{\# \text{ total OT realizadas}} \times 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Los objetivos de la optimización de activos comúnmente mencionados, son una combinación de mantenimiento basado en condición y el mantenimiento preventivo sumando estos un 65 por ciento o más, la distribución dependerá del proceso y del equipo; el mantenimiento correctivo debería ser menor al 35 por ciento. Los líderes del sector industrial inclusive fijaron un objetivo menor del 15% del mantenimiento correctivo total, siendo este el mantenimiento reactivo para el caso de fallas o amenaza de falla. Citado por Mitchell (2006, p. 70).

Como se puede ver, la mejor estrategia o alternativa para reducir el mantenimiento correctivo el cual impacta considerablemente en la disponibilidad de los activos, es mejorar el mantenimiento preventivo considerando actividades y frecuencias nuevas que fueron obtenidas producto de la experiencia; el mantenimiento predictivo puede ser reforzado con nuevas técnicas, tecnología y métodos.

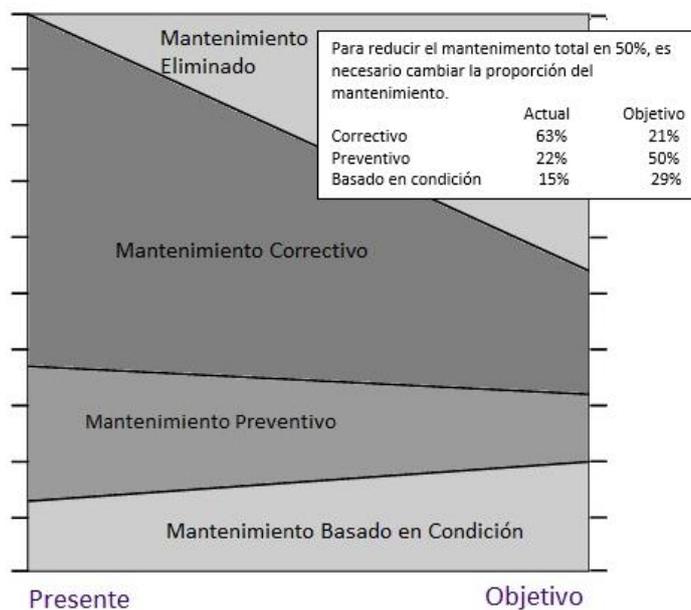


Figura 4 Trabajo de Mantenimiento Actual y Objetivo por Origen

Fuente: Recuperado de “Physical Asset Management Handbook”, (John S. Mitchell 2006)

Metodología del RCM2: El RCM es considerado como una herramienta muy eficaz que cubre las pautas para los gerentes ejecutivos que quieren alcanzar altos estándares de

mantenimiento. “El RCM se puede utilizar para la formulación de estrategias de mantenimiento para los equipos de producción y para el análisis de las fallas funcionales que incluyen factores humanos y medio ambientales” (Petrovic, et al, 2016).

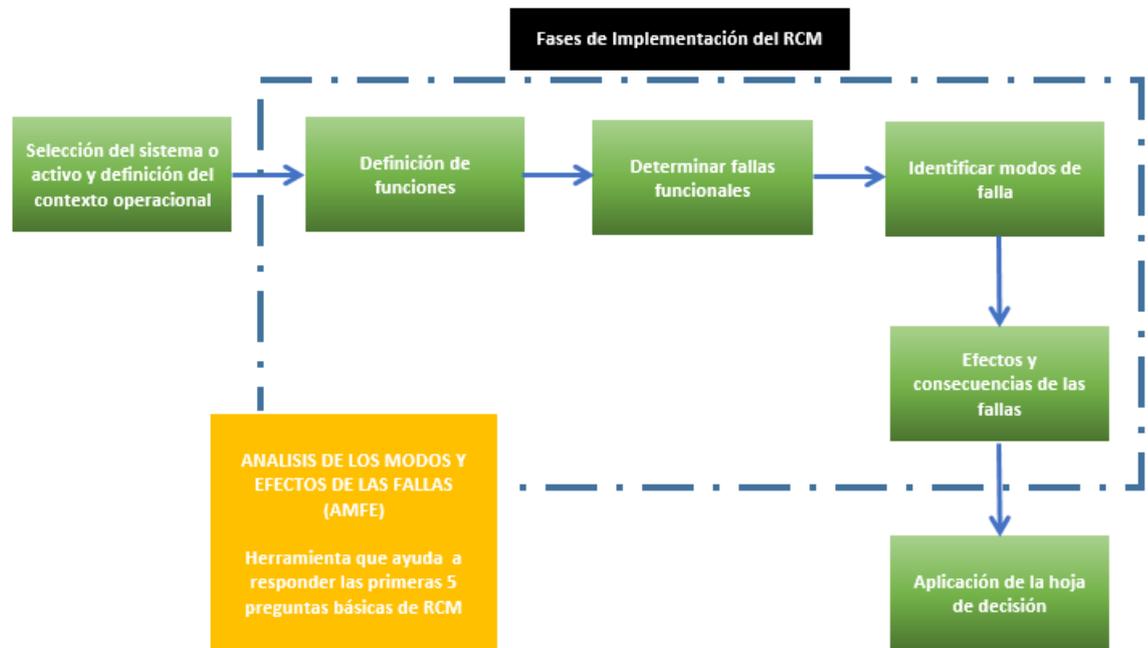


Figura 5 Fases de la Implementación del RCM

Fuente: Elaboración propia

Moubray (2000, p. 312) “Con la aplicación del RCM2 se logra: Mayor seguridad en integridad ambiental, mayor disponibilidad y confiabilidad de planta, mejor calidad del producto, mayor eficiencia del mantenimiento, mayor vida útil de los activos”.

El desarrollo del RCM2 se basa en las siete preguntas básicas, estas sirven para dirigir a los integrantes del equipo a determinar las causas de falla de los sistemas y para buscar actividades que puedan prevenir dichas fallas.

En las siguientes tablas se pueden apreciar la interacción de las 7 preguntas del RCM2 en el desarrollo del AMFE y en la hoja de decisión, estas preguntas están sistemáticamente desarrolladas para obtener la información relevante del activo para el desarrollo de la metodología.

Las siete preguntas básicas del RCM2

- A. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociado al activo en su actual contexto operacional?
- B. ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- C. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- D. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- E. ¿En qué sentido es importante cada falla?
- F. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- G. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

FUNCIÓN	TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUE SUCEDE CUANDO FALLO)
1 Suministrar fluido desde la descarga de bomba de recirculación hacia el sistema de bombas Geho a un caudal 1311 m ³ /h y 143.2 psi.	Función Primaria	A No suministrar fluido desde la descarga de bomba de recirculación hacia el sistema de bombas Geho	1 Rotura de pernos de quick release	Fatiga	La rotura de los pernos del quick release evita la transmisión del movimiento desde el bearing housing hacia el impulsor de la bomba, la detención de esta bomba causa que el espesador se sobre cargue y en un corto tiempo la alimentación de relave al espesador tenga que ser detenida.
1. ¿Cual es la función y parámetros del activo?		2. ¿De qué manera puede fallar?		3. ¿Qué origina la falla?	
				4. ¿Qué sucede cuando falla?	

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				Tareas "a falta de"				Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea a falta de	
F	FF	FM	H	S	E	O	H1	H2	H3	H4						H5
1	A	1	S	N	N	S	N	N	N				Realizar una inspección con luz estroboscópica durante la operación para detectar la integridad de los pernos del quick release	2 semanas	Mecánico	
			5. ¿Importa si falla?				6. ¿Se puede hacer algo para prevenir que falle?						7. ¿Qué pasa si no podemos prevenir la falla?			

Figura 6 Las 7 Preguntas básicas del RCM2

Fuente: Elaboración propia

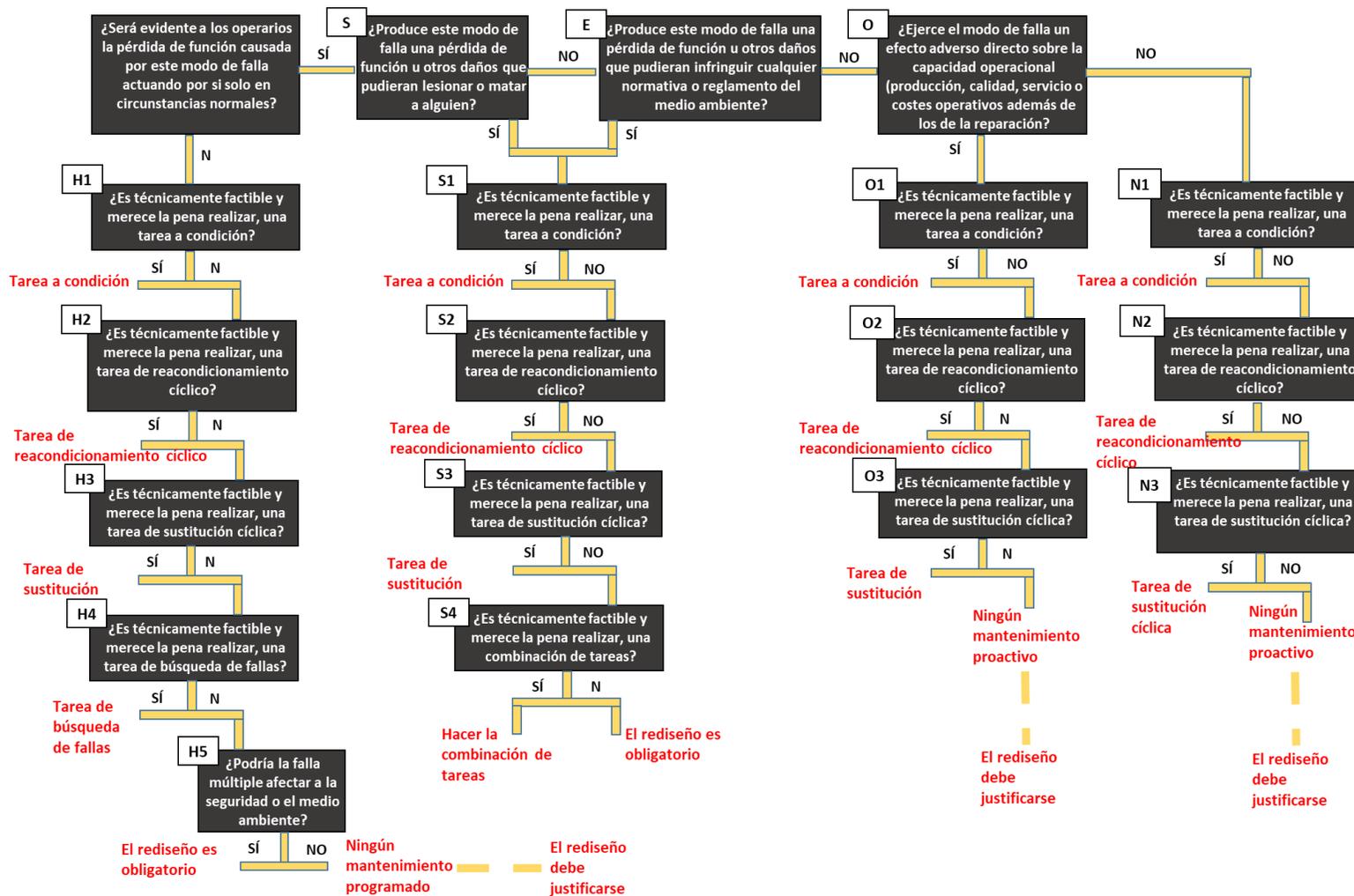


Figura 7 Flujo Lógico del Diagrama de Decisión RCM II

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2

Diagrama de decisión del RCM2. Ejemplo

“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM2 EN EL PROCESO DE MANTENIMIENTO, PARA INCREMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE LA ESTACIÓN DE BOMBAS GEHO EN UNA EMPRESA MINERA DEL DEPARTAMENTO DE JUNÍN”

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				Tareas "a falta de"			Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea a falta de	
F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	H4	H5	S4			
1	A	1	S	N	N	S	N	N	N	Ningún mantenimiento programado. Elaborar procedimiento de arranque para difusión entre las guardias junto con un entrenamiento.			-	Jefe de Operaciones	Procedimientos
1	A	2	S	N	N	S	N	N	N	Ningún mantenimiento programado. Elaborar procedimiento de arranque para difusión entre las guardias junto con un entrenamiento.			-	Jefe de Operaciones	Procedimientos
1	A	3	S	N	N	S	N	N	N	Ningún mantenimiento programado. Elaborar procedimiento de arranque para difusión entre las guardias junto con un entrenamiento.			-	Jefe de Operaciones	Procedimientos
1	A	4	S	N	N	S	N	N	N	Ningún mantenimiento programado. Elaborar procedimiento de arranque para difusión entre las guardias junto con un entrenamiento.			-	Jefe de Operaciones	Procedimientos
1	A	5	S	N	N	S	S			Monitoreo vibracional en el lado acople del motor-bomba. Se debe identificar velocidad de vibraciones con tendencia a incrementarse.			Mensual	Analista de Predictivo	
1	A	6								No aplica en análisis se verá en análisis de sistema de baja presión.					
1	A	7								No aplica en análisis se verá en análisis de reservorio de aceite.					

Fuente: Elaboración propia

2.3. Procedimiento

2.3.1. Coordinaciones en la zona de estudio

Reunir los permisos y entrenamiento de acuerdo a la política de seguridad para el ingreso y trabajos en áreas críticas.

Preparación de instrumentos de colección de datos (Ficha de registro de datos, guía de entrevistas, data de SAP, revisión de reportes de mantenimiento).

Coordinación con la gerencia, jefaturas de mantenimiento para la elección y formación del equipo de trabajo (mecánico, operador, electricista, supervisor, facilitador).

2.3.2. Toma de datos

Consignación de información de los manuales de mantenimiento.

Colección de información exportada del ERP SAP donde se han consignado todas las órdenes de trabajo relacionadas con cada una de las bombas de la estación.

Discriminación de la información no relevante.

Levantamiento de información de los equipos de la estación de bombas GEHO, comprende la colección de datos de falla y otros.

2.3.3. Análisis de la información

Se extraen y caracterizan los eventos que generaron detenciones de los equipos separándolos por tipo de componentes, luego se contabilizan las horas que se mantuvo el equipo detenido.

Se realiza el cálculo para obtener el MTBF, MTTR y la disponibilidad actual de la estación.

Se desarrolla el Diagrama de Pareto reconociendo cuáles son los tipos de falla que representan el mayor tiempo de detención.

Estas fallas son analizadas en el Diagrama de Ishikawa donde se debaten las posibles causas de las fallas ocurridas y que llevaron a la detención de los equipos.

Con los datos obtenidos del proceso anterior se inicia la metodología del RCM2 el cual, como resultado mostrará las actividades a implementar y que evitaren que el equipo falle.

2.4. Matriz de consistencia

Tabla 2
Matriz de Consistencia

Título	Formulación del problema	Objetivos	Variables	Indicadores	Diseño de la investigación
Propuesta de implementación del rcm2 en el proceso de mantenimiento, para incrementar la disponibilidad de la estación de bombas geho en una empresa minera del departamento de Junín	¿En qué medida se incrementará la disponibilidad de la estación de bombas GEHO en una empresa minera en el departamento de Junín mediante la implementación del RCM2 en el proceso de mantenimiento?	<p>Elaborar la propuesta de implementación de RCM2 en el proceso de mantenimiento, para incrementar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO en una empresa minera del departamento de Junín.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realizar el diagnóstico de la situación actual de la estación de bombas GEHO, midiendo los indicadores de disponibilidad de los equipos. • Diseñar las estrategias de RCM2 en base al análisis de modos y efectos de fallas de la estación de bombas GEHO, diseñando actividades preventivas, predictivas y correctivas. • Calcular los nuevos valores de los indicadores al implementar el RCM2 a la estación de bombas GEHO. • Realizar el análisis de viabilidad económica de la implementación de RCM2. 	Propuesta de implementación del RCM2	% de tareas preventivas realizadas % de tareas predictivas realizadas % de tareas correctivos realizados % mano de obra utilizada en tareas correctivas % de mano de obra utilizada en tareas predictivas	Según el enfoque es Cuantitativa Según su alcance es Explicativa Según su propósito es una Investigación Aplicada
			<u>Variable independiente (x)</u> Incrementar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO <u>Variable dependiente (y)</u>	% disponibilidad del equipo tiempo medio entre fallas en horas tiempo medio de reparación en horas	Según el diseño es una Investigación No Experimental

Fuente: Elaboración propia

2.5.Operacionalización de variables

Tabla 3
Operacionalización de la Variable Independiente

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad
Propuesta de implementación del RCM2 en el proceso de mantenimiento	Metodología utilizada para determinar qué deberíamos hacer para asegurar que el activo continúe realizando las funciones que sus usuarios quieren que haga dentro de su contexto operacional	Gestión de mantenimiento planificación y programación	% de tareas preventivas realizadas	% Porcentaje
			$= \frac{\# \text{ de tareas preventivas realizadas}}{\# \text{ total tareas realizadas}} \times 100$	
			% de tareas predictivas realizadas	% Porcentaje
			$= \frac{\# \text{ de tareas predictivas realizadas}}{\# \text{ total tareas realizadas}} \times 100$	
			% de tareas correctivas realizadas	% Porcentaje
			$= \frac{\# \text{ de OT correctivas realizadas}}{\# \text{ total OT realizadas}} \times 100$	
			% de mano de obra utilizada en tareas correctivas	% Porcentaje
			$= \frac{\# \text{ horas actividades correctivas}}{\# \text{ total horas de mantenimiento}} \times 100$	
			% de mano de obra utilizada en tareas predictivas	% Porcentaje
			$= \frac{\# \text{ horas actividades predictivas}}{\# \text{ total horas disponible MPD}} \times 100$	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4
Operacionalización de la Variable Dependiente

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad
Incrementar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO	Nivel de confianza que se tiene de que una máquina o componente realice su función favorablemente en un tiempo dado, dentro de su contexto operacional	Gestión de producción	% disponibilidad del equipo	% Porcentaje
			$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	
			tiempo medio entre fallas	Hora (hra)
			$MTBF = \frac{Horas Operadas}{N^{\circ} de Fallas}$	
			tiempo medio de reparación	Hora (hra)
			$MTTR = \frac{Horas de Fallas}{N^{\circ} de Fallas}$	

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Diagnóstico de la situación actual de la empresa

La EM perteneciente a capitales asiáticos posee grandes depósitos de mineral de bajo grado de cobre y sulfuros de molibdeno, el proyecto se ubica a en la actual ciudad de Morococha en la cordillera de los andes, aproximadamente a 145 Km al este de la ciudad de Lima. Los rangos de altura donde se realiza la operación se encuentra desde los 4500 a 5000 metros sobre el nivel del mar.

El cálculo estimado de contenido probado y reservas probables de mineral son 1'545,000,000 toneladas métricas con un promedio de 0.476% de cobre, 0.019% de molibdeno.

Misión

La misión es la contribución con el progreso local, nacional y global, así como con el éxito de los accionistas, a través de la transformación cuidadosa y eficiente de recursos naturales.

Visión

La visión es el reconocimiento como una empresa minera de primer nivel, debido a la alta eficiencia y la calidad de su gestión.

Valores

Integridad: Actúa de manera honesta, justa, ética y transparente en todo lo que se realiza; además, se honra compromisos y se cumple con las leyes y las políticas corporativas.

Respeto: Se trata a todas las personas de manera justa y equitativa, todo el tiempo, demostrando dignidad y cortesía.

Colaboración: Se trabaja en equipo para conquistar objetivos comunes.

Innovación: Cuenta con un ambiente de trabajo que promueve la generación de nuevas ideas y métodos para hacer las cosas; en ella se desarrollan soluciones innovadoras y se estimulan nuevas maneras de pensar y trabajar.

Responsabilidad: Se asume las consecuencias de las decisiones, acciones y resultados. Se brinda un máximo esfuerzo en todo lo que se hace y se trabaja con alta eficiencia y calidad.

Buen vecino: La seguridad es la principal prioridad y se demuestra cuidando las vidas, las de los trabajadores y la integridad de las instalaciones en todo lo que se realiza. Se promueve una sana, constructiva y cercana convivencia con las comunidades del entorno y se está comprometido con los mayores estándares ambientales de la industria.

3.1.1. Organigrama del área de mantenimiento

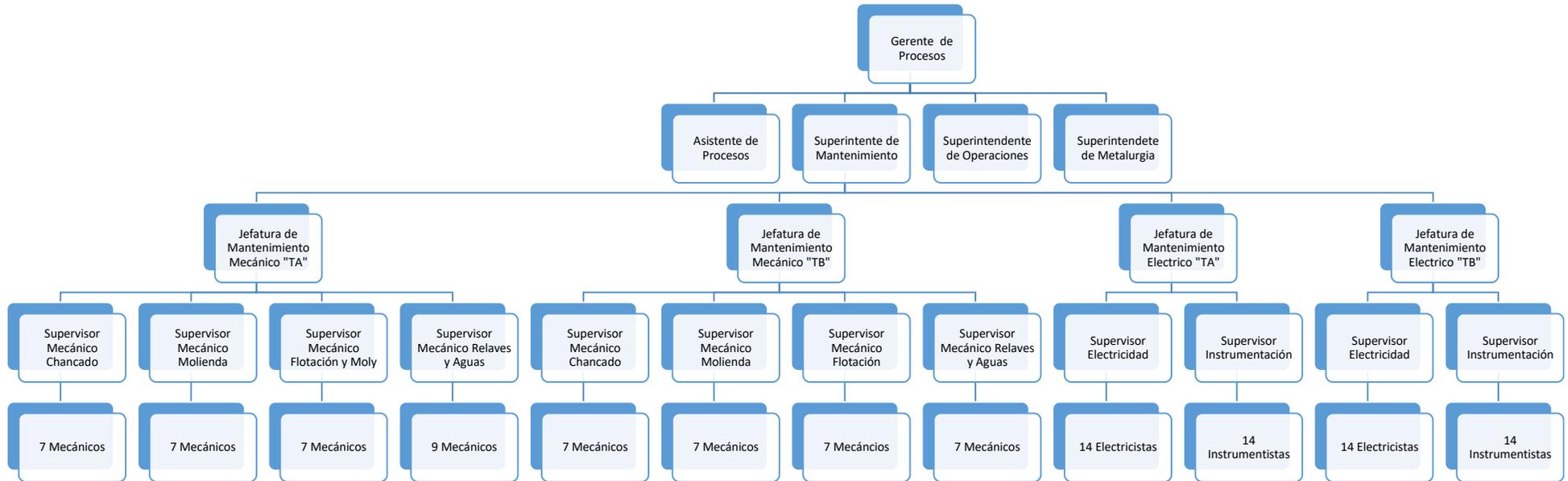


Figura 8 Organigrama del Área de Mantenimiento de la (EM)

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Resultados del análisis de la disponibilidad mecánica en la situación actual

En la siguiente tabla se representan las disponibilidades de cada una de las bombas GEHO (048 ~058) de la estación de bombas de la (EM), obteniendo un promedio anual de 88.90%, considerando que el valor se encuentra por debajo del target requerido por la alta dirección es cual es 95.0%; motivo por lo cual no es aceptable y se requiere tomar acción ante las fallas ocurridas.

En adición a este enunciado se debe indicar que los eventos que marcaron la condición, donde se incurrieron en fallas que llevaron a la caída de los indicadores se encuentran posteriores a los meses de junio y julio del año 2019. Esto como consecuencia del cambio del trazado de la nueva línea de bombeo, donde hubo un incremento de presión, por consiguiente, mayor vibración de todo el sistema estructural, sumado a las condiciones operativas de los equipos como mineral que no cumple con la especificación de diseño de los equipos, que no pueden ser mitigados debido al mineral complejo que posee la mina.

Es por ello la necesidad de elevar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO para llevar a la concentradora a una operación estable, con un “throughput” de diseño, sin perturbaciones en el proceso de flotación, molienda y filtrado ya que también impacta en la recuperación de Cu fino (producto final).

Un nuevo KPI de mantenimiento fue agregado para el año 2020, consiste en elevar la disponibilidad individual de las bombas a 95% para el cumplimiento de la meta anual, ya que se prevé que los grados de recuperación caerán por el tipo de material que corresponde según el plan de minado para los siguientes años.

Tabla 5

Disponibilidad de la Estación de Bombas GEHO 2019 Situación Actual

Equipo	Descripción de equipo	Tiempo de inactividad	Horas Operadas	N# de Fallos	MTTR	MTBF	Disponibilidad
1002063	BOMBA GEHO PP-048	997	7643	111	8.98	68.86	88.5%
1002062	BOMBA GEHO PP-049	1050	7590	139	7.55	54.60	87.8%
1002061	BOMBA GEHO PP-050	1002	7638	140	7.16	54.56	88.4%
1002060	BOMBA GEHO PP-051	1065	7575	122	8.73	62.09	87.7%
1002059	BOMBA GEHO PP-052	1029	7611	133	7.74	57.23	88.1%
1002058	BOMBA GEHO PP-054	452	8188	100	4.52	81.88	94.8%
1002057	BOMBA GEHO PP-055	1012	7628	105	9.64	72.65	88.3%
1002056	BOMBA GEHO PP-056	999	7641	110	9.08	69.46	88.4%
1002055	BOMBA GEHO PP-057	908	7732	105	8.65	73.64	89.5%
1002054	BOMBA GEHO PP-058	1073	7567	129	8.32	58.66	87.6%
Valor Promedio (10 Bombas GEHO)		958.7					
Horas Base de Operación (360 días)		8640				Promedio	88.9%
Total inactividad		9587					

Fuente: Elaboración propia



Figura 9 Disponibilidad de la Estación de Bombas GEHO 2019

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la caracterización de las fallas de los equipos obteniendo el cuadro inferior mostrado y que sirvió de base para la elaboración del diagrama de Pareto donde se determina el tipo de falla funcional, que ocurrió y generaron las detenciones que consiguientemente impactaron en los resultados.

El total de fallas operacionales sumaron 9587 horas, las cuales fueron asignadas a cada síntoma de falla.

La data procesada se obtuvo desde el ERP SAP GUI, (sistema informático de gestión) que utiliza la empresa (EM) para la gestión del mantenimiento, logística, control de horas, RR.HH., etc.

El cuadro resumen muestra que la mayor detención tipificada fue a causa de la rotura de pernos de cimentación de los “power end” de las bombas 048, 049, 050, 051, 052, 053, 055, 056, 057, 058. La única bomba que en el periodo de estudio no presentó esta falla fue la 054; pero posteriormente está salió de operación por el mismo motivo en el periodo 2020.

Por otro lado, la segunda causa se debe al cambio recurrente de válvulas cónicas (tiempo estimado de vida 2000 h c/u) pero al finalizar el año 2019 se realizaron 717 cambios debido a la complejidad del material del proceso, el nuevo modo de falla identificado en la válvulas y asientos cónicos debido al incremento de la presión de descarga por el consiguiente cambio de trazado o ubicación de la línea de descarga de relaves que obedece al crecimiento planeado de la presa.

Antes del periodo de estudio y a manera de generar ahorro de costos, estas válvulas cónicas según la proporción de desgaste encontrado (<20% de desgaste), se enviaban a reparar de manera local bajo procedimientos de soldadura establecidos por la empresa contratista; pero luego del incremento de presión y el nuevo modo de falla, no se puede realizar esta práctica ya que los componentes salen totalmente inservibles.

La tercera causa de detenciones fue relacionada a las válvulas 2/2 de control hidráulico (llenado y vaciado de aceite propelente de los diafragmas) este tipo de falla tiene relación con diferentes síntomas los cuales provocan desde falla por señales de llenado y vaciado, no confirmación de posición de “monitoring rod”, golpes hidráulicos debido a la falta de aceite propelente, sobre presión de líquido propelente, etc.

La cuarta causa de detenciones es la relacionada a la fractura de “spool” de descarga de las bombas las cuales están influenciadas por la vibración y la falta de amortiguamiento del sistema de bombeo, se resalta que estas bombas envían el flujo de manera pulsante, debido a la naturaleza de su funcionamiento.

Tabla 6
Cuadro Resumen de Fallas Presentadas en la Estación de Bomba GEHO

SINTOMA DE LA FALLA	Hras de Reparación
Cambio de pernos de power end	4536
Cambio de válvulas cónicas	1971
Válvulas 2/2 falla	824
Cambio de spools x falla	504
Cambio de Manifolds	274
Falla de válvula de drenaje o descarga	256
Alta vibración por desalineamiento	156
Rotura de diafragma	132
Cambio non return valve	96
Rellenar presión N2 a dampener x cambio de presión	88
Fugas sistemas hidráulicos	87
Falla non return valves	84
Limpieza de ignitors x falsa señal	79
Válvulas 3/2	74
Limpieza de succión	59
Falla instrumentación no confirma señales	52
Cambio de válvulas cónicas x trabamiento	52
Cambio de valve housing	50
Falla dampener	48
Cambio de aceite contaminación	32
Bomba auxiliares presentan fugas	30
Pernos rotos válvulas, estructuras	28
Perdida de presión de en diafragma de dampener	22
Cambio válvula relief de seguridad	16
Fugas por Tubbing	14
Cambio de bombas hidráulicas x falla	12
Cambio de valve cover x desgaste	11
TOTAL	9587

Fuente: Elaboración propia

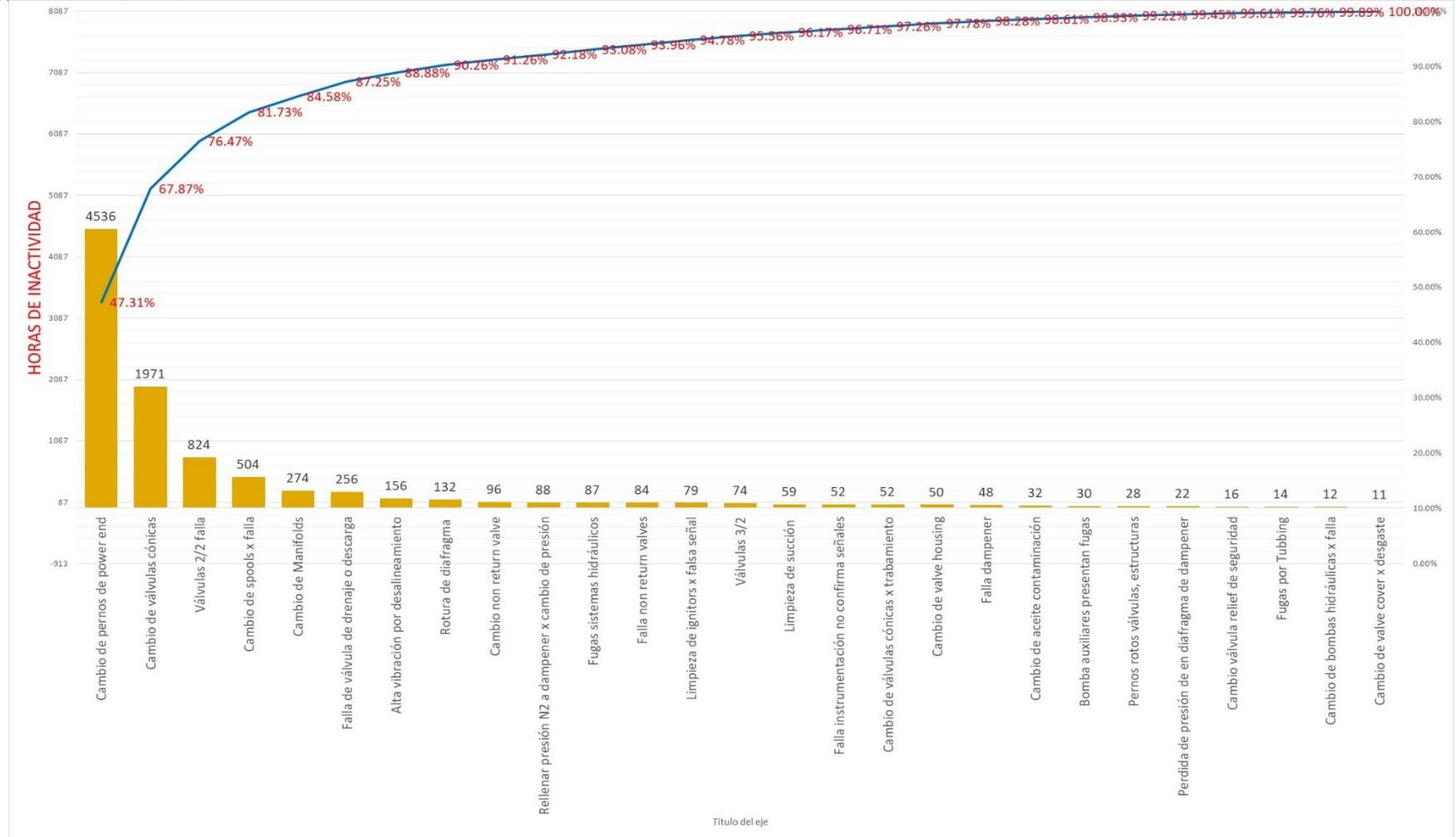


Figura 10 Pareto de Fallas Presentadas en la Estación de Bombas GEHO

Fuente: Elaboración propia

En el siguiente diagrama de causa – efecto se puede relacionar los diferentes factores que desencadenan fallas funcionales que tienen efecto sobre la disponibilidad de las bombas.

Este diagrama está elaborado bajo las condiciones actuales de trabajo, donde las fallas funcionales se han incrementado en unos casos y en otros se han modificado con respecto al comportamiento del equipo al inicio de la operación.

Es suficiente que una falla funcional llegue a suceder en uno de los componentes del equipo, deteniéndose ya sea por la activación de una protección, por la pérdida de función primaria o por la alteración de parámetros operativos como vibración, temperatura, amperaje, ruido o por golpeteo.

La falta de una pronta solución a problemas presentados en el equipo, desencadena consecuencias más graves debido a la complejidad de la bomba, así como a la severidad de las fallas a presentarse. Se requiere de una gran capacidad de análisis cuando se presentan las fallas funcionales para poder diagnosticar los problemas rápidamente para realizar el plan para la corrección de las fallas a posteriori.

El diagrama causa – efecto es una gran ayuda para el personal técnico en la búsqueda y solución de las fallas en el equipo.

Es muy importante resaltar que la capacitación y la práctica influyen mucho en la realización de los trabajos de mantenimiento de manera óptima y eficiente, debido a que la detención del equipo por largos periodos de tiempo impacta a la producción porque el molino de SAG debe ralentizar la producción.

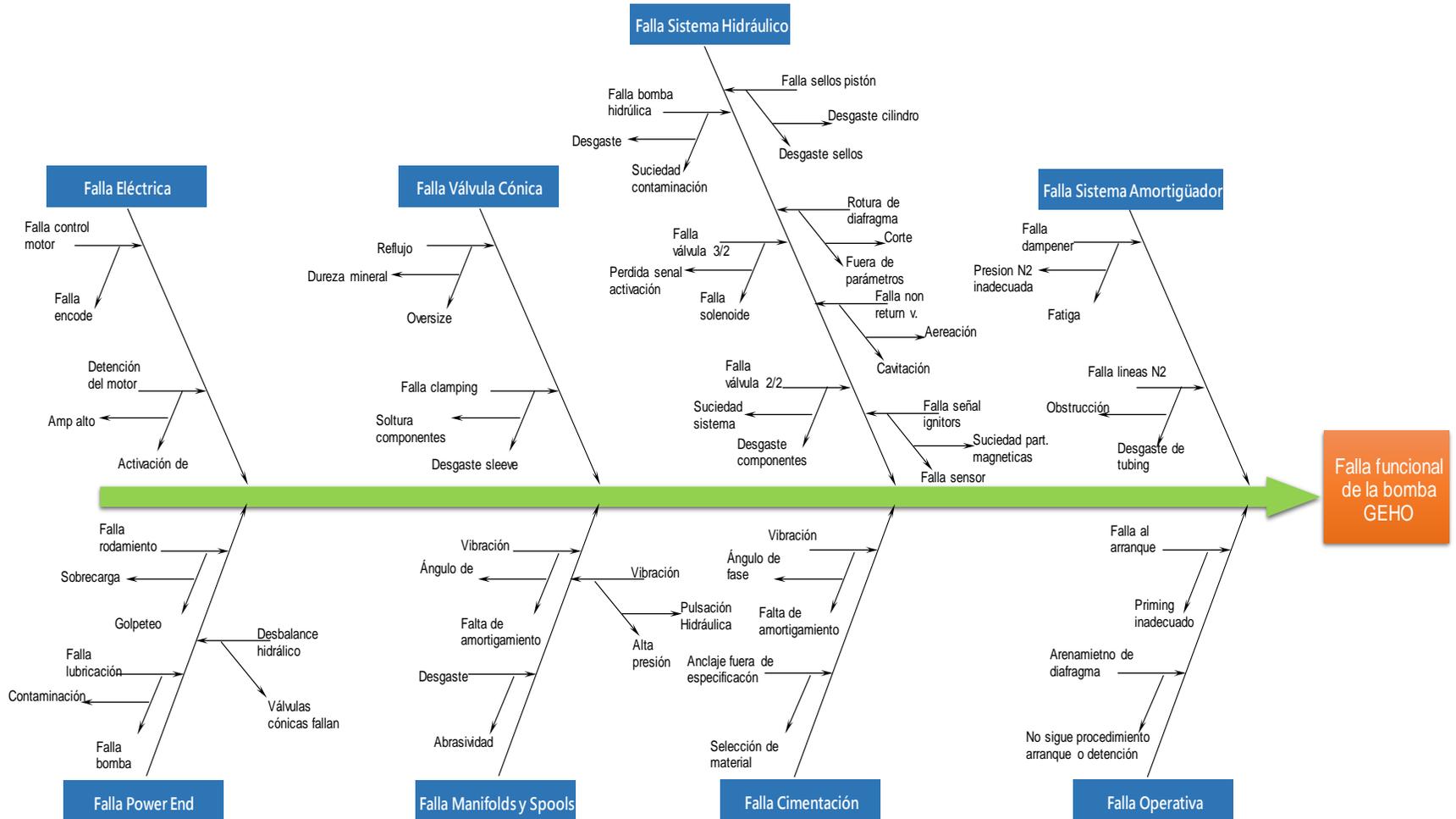


Figura 11 Diagrama Causa – Efecto “Falla Funcional de la Bomba Geho”

Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Indicadores de gestión de mantenimiento en la situación actual

Tabla 7
Porcentaje de Tareas Preventivas, Predictivas y Correctivas Realizadas

Datos	Valor
Total de Tareas Preventivas Realizadas	420
Total de Tareas Predictivas Realizadas	275
Total de Tareas Correctivas Realizadas	1194
Total Tareas Mantenimiento Realizadas	1889
<hr/>	
% de Tareas Preventivas Realizadas	22%
% de Tareas Predictivas Realizadas	15%
% de Tareas Correctivas Realizadas	63%

Fuente: Elaboración propia

Los datos que intervienen en el cálculo, relacionan la cantidad de órdenes de trabajo de carácter preventivo, predictivo y correctivo ejecutados durante el periodo 2019, de un total de 1889 actividades realizadas en el área, el 63% corresponden a atenciones correctivas, siendo un valor muy alto, consideremos que estamos trabajando con divisores que representan la cantidad de fallas presentadas sin discriminar el tiempo que toma cada falla, pudiendo ser estos desde un reflujo, que tan solo puede indisponer el equipo por un lapso de 3 horas (considerando el procedimiento de bloqueo + transporte), hasta una falla de manifold (fisura) la cual indispone el equipo hasta por 36 horas y otros más que impactan por mayor tiempo tales como, fallas en el sistema de líquido propelente, cambio de manifolds y reparaciones de cimentación, 15% a actividades predictivas de monitoreo y un 22% corresponden a actividades preventivas

siendo consideradas en estas los PM de 8000 h. y los 4000 h. únicos recomendados por el Vendor.

Este valor luego de la implantación del RCM2 en la estación de bombas GEHO, debe disminuir considerablemente ya que en ello se enfoca la estrategia.

La indisponibilidad no solo se puede deber a problemas relacionados con mantenimiento o fallas en los equipos, sino que también interactúa con la falla operacional, que generalmente no pone al equipo indisponible, pero sin embargo el del circuito queda indisponible para la producción, con la alteración del proceso debido a la complejidad del mineral que circula por todo el circuito y que en el caso existiera un descontrol, se originan muchas fallas relacionadas con atoros, aumento de reflujos por “oversize” del mineral, etc.

Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Correctivas

$$= \frac{\# \text{ horas actividades correctivas}}{\# \text{ total horas de mantenimiento}} \times 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Predictivas

$$= \frac{\# \text{ horas actividades predictivas}}{\# \text{ total horas disponible MPD}} \times 100 \quad \text{Ecuación 8}$$

Tabla 8
Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Correctivas Situación Actual

Datos	Valor
H-H de Mantenimiento disponible 3 Mecánicos, 12 horas, 360 días	12960
Horas que se derivaba personal a otras áreas	2771
Horas en Tareas Correctivas	6403
Horas en Tareas Preventivas	3786
<hr/>	
% horas en actividades Preventivas	29%
% horas en actividades Correctivas	49%
% horas otras Áreas	22%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9
Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Predictivas Situación Actual

Datos	Valor
H-H de Mantenimiento disponible 2 MPD, 3 horas, 90 días	810
Horas en Tareas Predictivas	720
<hr/>	
% de uso H-H en actividades predictivas	89%

Fuente: Elaboración propia

El cálculo realizado nos muestra información acerca del porcentaje de horas hombre empleadas para realizar el mantenimiento correctivo alcanzando un valor de 49% y de 29% para las actividades preventivas. El 22% de horas hombre restante que se distribuyen a actividades de mantenimiento importantes relacionadas a otras áreas como suministro de aguas y filtros de concentrado según el plan de mantenimiento actualmente establecido.

Una vez implementado el RCM2 debemos ver reducción en el porcentaje de horas hombre de trabajo correctivo e incrementar el trabajo preventivo y predictivo. Con esto aseguraremos el cumplimiento de las actividades encontradas.

3.2. Implementación RCM2

3.2.1. Contexto operacional bomba Geho

La bomba tiene las siguientes especificaciones técnicas: 655.25 m³/h al 100% de velocidad (diseño), 524.2 m³/h al 80% de velocidad (nominal).

La presión de descarga de diseño es de 11000 KPa y presión nominal de 10000 KPa a usar en la segunda fase, en la primera fase la presión de descarga será de 8100 KPa.

La bomba de diafragma y pistón GEHO es una bomba alternativa de desplazamiento positivo diseñada para manipular líquidos contaminados con sólidos, como fangos, lodos y barros, especialmente cuando intervienen materiales abrasivos o agresivos.

Los pistones desplazan el líquido propulsado para que accione el diafragma conectado, el cual, a su vez, bombea los lodos. El flujo total de la bomba es la combinación del flujo de los tres alojamientos de los diafragmas. Los 3 pistones se encuentran uno detrás de otro, y el cigüeñal tiene un ángulo de 120°. Un diafragma de caucho separa la pulpa del líquido propulsado limpio. El relave bombeado no entra en contacto con piezas móviles como el pistón, su vástago o la camisa del cilindro.

Se cuenta con los siguientes enclavamientos de protección del equipo:

- Detención si la presión de descarga de la bomba sobrepasa los 8910 KPa.
- Detención si la presión de aire de instrumentación esta debajo de 400 KPa.
- Detención si la temperatura de sistema de lubricación sobrepasa los 80°C.

- Detención si la temperatura de lubricación del gearbox sobrepasa los 100°C.
- Detención si la temperatura de rodamiento del gearbox sobrepasa los 120°C.

Se muestra la Datasheet B con las especificaciones técnicas de la bomba en la figura.



Project No. C-560
Equipment Specification 255-TS-P-028
Tailings Distribution Pumps
Rev 02

DATA SHEET B			Rev
Equipment Name: Tailings Distribution Pumps	Equip. No: 255-PP-048 to 052, 054 to 058		2
Manufacturer	Weir Minerals Netherlands bv		
Model Number & Size	Single Acting Crankshaft Driven Piston Diaphragm Pump. Type: TZPM2000		
PUMP DATA			
Capacity	m ³ /h	655.25	
	Motor rpm	1800	
Pump Efficiency,	%	93,7	0
Pump Brake Power,	kW	Phase1: 1568 kW (phase 2: 2137kW)	
NPSH Required,	bara	4.0	0
OPERATING DATA			
Number of Diaphragms and Orientation	3		
Piston Strokes Per Minute, Design	50.7 rpm		
Piston Strokes Per Minute, Nominal	40.5 rpm		
Piston Strokes Per Minute, Maximum	50.7 rpm		
	94.0 % (@ phase 1: 81 bar)		
Mechanical Efficiency at Design	93.7% (@ phase 2: 110 bar)		
Expected Volumetric Efficiency	93% (for phase 1 & phase 2)		
Flow and Pressure as Expected	10-100 % flow control up to 110 bar		
Actual Volumetric Efficiency,	≥ 93 % for complete operating range		
	9,300 (@ phase 1)		
Internal Relief Set Pressure	kPa	12,600 (@ phase 2)	1

Figura 12 Data Sheet B Equipment Specification

Fuente: Elaboración propia

Recuperado de “Installation, Operating and Maintenance Manual”., Weir Minerals Netherlands, 2011.

Sistema de transmisión

La transmisión se realiza a través de un reductor de la marca Flender el cual es lubricado por aceite forzado a través de un enfriamiento por aire externo. Si la temperatura del aceite de lubricación sobrepasa los 80°C o la presión de lubricación cae por debajo de 20 KPa, se detiene la bomba. Si la temperatura del reductor pasa los

100°C o la temperatura de los rodamientos sobrepasan los 120°C, se detendrá la bomba.

Líquido propelente

La bomba Geho de modelo y tamaño TZPM 2000, es una bomba de desplazamiento positivo, cuenta con 3 diafragmas, el diafragma de caucho separa el lodo bombeado del líquido propulsado limpio. Existe una conexión de líquido propelente entre los tres componentes.

Cuenta con un sistema de control automático, proporciona controles de:

- Controla y limita la carrera de los diafragmas de la bomba.
- Regula el volumen del líquido propulsado dentro de los límites.
- Protege los diafragmas de una tensión excesiva.

Si la posición normal de carrera del diafragma cambia (como consecuencia del aumento o la disminución del líquido propulsado), el marcador de posición de la varilla de control alcanza la sonda de control trasera o delantera, y según ejecuta el llenado o el vaciado con la cantidad necesaria de líquido propulsado entre el pistón y el diafragma. Si, con la bomba en marcha, el sistema de carga o de salida no puede corregir la cantidad de líquido propulsado, en un tiempo de 3 minutos, el sistema de control automático detendrá la bomba. De mantener durante más tiempo sin corregir el volumen de líquido propelente adecuado fallara prematuramente el diafragma.

El sistema también cuenta con un testeo de confirmación de sensores de posición de diagrama cada 60 minutos y de no confirmar posiciones, el sistema de control automático detendrá la bomba. De mantener durante más tiempo sin corregir el volumen de líquido propelente adecuado fallara prematuramente el diafragma.

La presión de succión en cada bomba durante el presente año es de 530 KPa – 730 KPa, y muy ocasionalmente valores por debajo de 400 KPa, la bomba requiere un NPSH mínimo de 400 KPa (sensor 255PIT0055). Se cuenta con un tanque air vessel a 500 KPa, el cual minimiza las variaciones de presión en la línea de aspiración. Como resultado, el caudal en la línea de aspiración es siempre constante. De presentarse presiones de succión por debajo de 400 KPa no se asegura una operación confiable y existe desgaste prematuro por cavitación.

La presión de descarga en las bombas durante el año 2019 está entre 4900 KPa - 6300 KPa, sin embargo, antes de modificar la línea de descarga las presiones fluctuaban entre 2500 KPa – 4500 KPa, y durante los tres primeros meses después de la modificación se tuvieron presiones de hasta 7000 KPa. La presión de descarga máxima en cada bomba para la primera fase es de 8910 KPa, de superar este valor se detendrá la bomba. Cuenta adicionalmente con un sistema de protección a 9300 KPa activada por una válvula de alivio.

Dampener

El amortiguador de pulsaciones de descarga (acumulador de nitrógeno) minimiza las variaciones de presión en la línea de descarga. Como resultado, el caudal en la línea de descarga es siempre constante. Se tiene seteado para un rango de operación de presión de descarga de 4000 KPa a 6000 KPa una presión de 3200 KPa, El fabricante sugiere una presión específica para rangos cortos de presión de descarga (para rangos de presión amplios pierde eficiencia en su función). Después del cambio de la línea de descarga de presión hacia la presa de relaves en junio 18, se siente mayor vibración en las bombas. De tener presiones de descarga fuera del rango seteado se perder eficiencia

en el amortiguamiento de las pulsaciones, generando fallas prematuras en los componentes.

3.2.2. Contexto del sistema de bombeo

Los espesadores descargan lodos a un ritmo entre 4800 m³/h a 5800 m³/h hacia el sistema de bombeo, esta variación se debe a la granulometría del mineral P80, condiciones del mineral, contexto operacional del área de Molienda y mantener parámetros estables de torque y agua clara en los espesadores, etc. La velocidad actual de las bombas usualmente está entre 85% - 90%. La información del proyecto de Aker Solutions indica que la capacidad nominal de bombeo del sistema es de 4194 m³/h (80% de velocidad) y la capacidad de diseño es de 5243 m³/h (100% de velocidad), información del proyecto de Aker Solutions. La información del fabricante indica no haber restricción de operar la bomba al 100%.

La presión de succión en ambas líneas durante el presente año es de 380 KPa – 550 KPa, y ocasionalmente se encuentran valores de 320 KPa, los lodos deben ingresar al sistema de bombeo con una presión superior a 200 KPa en cada línea (tren 1 para bombas 048, 049, 050, 051 y 052 sensor 255PIT2419; tren 2 para bombas 054, 055, 056, 057 y 058 sensor 255PIT2421), cabe mencionar que la diferencia entre la presión de succión del tren y de la presión de succión en cada bomba es de 200 KPa, valores menores a lo recomendado de manera ocasional. La rápida y alta fluctuación en la línea de presión de succión indica inestabilidad y una de las causas es la presencia de refluo. De ingresar presiones menores se generarán problemas como cavitación el cual genera desgaste prematuro de componentes e inclusive fractura de componentes rotativos. Cada bomba tiene 6 puntos de drenaje (1 por cada diafragma y 1 en cada válvula anti retorno) y deben ser drenados una vez por turno.

La granulometría enviada al sistema de bombeo en promedio es de 9 mm a 12 mm, habiendo alcanzado en ocasiones tamaños de 18 a 20 mm y muy ocasional mineral de 25 mm, una las ocasiones donde se envía alta granulometría se da cuando se realizan lavado del molino SAG, otro caso es cuando se realiza la parada mayor de Molienda la llegada de alta granulometría es más prolongado pudiendo durar algunos días en esta condición. Una práctica actual para no disminuir el flujo enviado de espesadores es incrementar una bomba y de no poder se incrementa la velocidad de la bomba y por ende disminuir la presión de succión inclusive por debajo de los 400 KPa. Procesar el flujo enviado con lodos con alta granulometría genera desgaste prematuro de las válvulas de succión y descarga, inclusive puede generar agarrotamientos de válvulas, también genera incremento de vibración y ruido en todo el sistema. El fabricante estima una duración de las válvulas de 2000 horas de cumplirse el contexto operacional de diseño, actualmente las válvulas de succión y descarga tienen una duración entre 300 y 400 horas en promedio. Según las condiciones de diseño el fabricante permite para este equipo un tamaño máximo de partícula de 6 mm.

Cada bomba al ser de pistón - diafragma genera pulsaciones y se integra a un sistema, como resultado los pulsos de presión actuaran sobre el sistema de tuberías pudiendo ocasionar vibración en la estructura (soportes, cimentación), una vibración significativa en la tubería puede ocasionar daños en la misma, especialmente en los soportes también se ve reflejado en la ruptura de la cimentación incrementándose considerablemente el ruido en la estación de bombeo. Para minimizar la vibración de las pulsaciones producidas en las distintas bombas, se cuenta con una lógica de sincronización entre todas las bombas en operación. Para lograr esto se mide el desfase angular de cada bomba con respecto a una posición de referencia, el cual es generada

por la lógica de control y es llamada Virtual master (bomba 048). Esta posición de referencia está en función al set point de velocidad de las 10 bombas, el cual proviene da la salida del lazo de control de presión de succión de las Geho, y es igual para todas las bombas. En función a este set point de velocidad, el VirtualMaster generado por la lógica gira con cierta velocidad y todas las bombas deben seguir. La lógica compara en ángulo del VirtualMaster con el ángulo real de cada bomba, si una bomba se encuentra por detrás del VirtualMaster, la lógica acelera dicha bomba para alcanzar al VirtualMaster, de la misma forma, si una bomba se encuentra por delante del VirtualMaster, la lógica desacelera dicha bomba para igualarse con el VirtualMaster. La aceleración o desaceleración de cada bomba, para mantenerse alineada con el VirtualMaster, es controlada por un lazo PID. El objetivo del desfase angular es cero. De trabajar una bomba con Angulo de desfase muy por encima del objetivo (0°) generara incremento de vibración, a mediano y largo plazo esta vibración generara falla prematura de diversos componentes especialmente tuberías y manifolds. Según estudio del fabricante el desfase virtual debe ser 0° y la bomba también debe tener un desfase mecánico de 0° . De tener desfase virtual mayores a 0° se incrementarán las vibraciones en el sistema.

Tabla 10
AMFE Unidad de líquido propelente

FUNCIÓN	TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)	
1 Transmisor de fuerza y amortiguación del diafragma, a presión de operación entre límites dados 8000 kPa	Función Primaria	A Alta presión del líquido propelente en el diafragma	1 Presión elevada líquido propelente > 2500 KPa	Procedimiento	Sobrecarga de DIAPHRAGM (824.100.001), Rotura del DIAPHRAGM (824.100.001), Deterioro del TRANSDUCER / MONITORING ROD (832.101.209), PRESSURE GAUGE (973.000.015) > 900 Kpa Valor de presión de la bomba 2500 kPa max	
			B Baja presión de líquido propelente	1 Fuga en las NON- RETURN VALVE (853.010.259)	Desgaste	El DIAPHRAGM (824.100.001) golpea la pared trasera del DIAPHRAGM HOUSING (045.109.001). Deterioro y posterior rotura de DIAPHRAGM (824.100.001). Alarma de "3 minute filling valve" "Válvula de llenado de 3 minutos" si el monitoring rod no cambia de estado, se detiene el equipo por protección. (Demasiadas señales de llenado mientras la bomba esta encendida)
				2 Obstrucción FILTER-ELEMENT (921.700.862)	Suciedad	El DIAPHRAGM (824.100.001) golpea la pared trasera del DIAPHRAGM HOUSING (045.109.001). Deterioro y posterior rotura de DIAPHRAGM (824.100.001). Alarma de "3 minute filling valve" "Válvula de llenado de 3 minutos" si el monitoring rod no cambia de estado, se detiene el equipo por protección. (Demasiadas señales de llenado mientras la bomba esta encendida). Variación de FLOW SENSOR (971.600.008)
				3 Sistema de bombeo líquido propelente ineficiente: ELECTRIC MOTOR (814.201333.45) GEAR PUMP (960.020.079) COUPLIG (960.010.630)	Desgaste	El DIAPHRAGM (824.100.001) golpea la pared trasera del DIAPHRAGM HOUSING (045.109.001). Deterioro y posterior rotura de DIAPHRAGM (824.100.001). Alarma de "3 minute filling valve" "Válvula de llenado de 3 minutos" si el monitoring rod no cambia de estado, se detiene el equipo por protección. (Demasiadas señales de llenado mientras la bomba esta encendida). Variación de FLOW SENSOR (971.600.008)
			4 Suministro de presión de aire comprimido demasiada baja < 700 kPa	Caja negra	Drenaje o llenado de líquido propelente en el DIAPHRAGM (824.100.001). Demasiadas señales de llenado o vaciado de las válvulas 2/2 de líquido propelente sin cambiar de estado los MONITORING ROD. Low 450 kPa Low Low 400 kPa	
		C Bajo volumen de líquido propelente en el diafragma	5 El HYD. ACCUMULATOR (973.000.015) < 1800 kPa con la presión inferior a la recomendada de trabajo	Error humano mantenimiento	La bomba del líquido propelente se enciende y vuelve a llenar el acumulador, da una alerta "Panel Táctil GEHO HMI". Si sigue bajado la presión de la bomba se apaga. 1100 kPa System pressure Low 1300 kPa Start fill accumulator 1800 kPa Stop fill accumulator	
			1 Fuga en los tubing de líquido propelente	Desgaste	Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba esta en marcha. Alarma de "3 minute filling valve" "válvula de llenado 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI. La bomba de líquido propelente se enciende con demasiada frecuencia. Sin que cambie de estado el MONITORING ROD	
				2 Falla válvula 2/2 de llenado de líquido propelente (853.010.241)	Desgaste	Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba esta en marcha. Alarma de "3 minute filling valve" "válvula de llenado 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI. La bomba de líquido propelente se enciende con demasiada frecuencia. Sin que cambie de estado el MONITORING ROD equipo para.

FUNCIÓN	TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)
			3 Falla válvula 3/2 que controla la válvula 2/2 de llenado de líquido propelente (972.200.065)	Desgaste	Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba esta en marcha. Alarma de "3 minute filling valve" "válvula de llenado 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI. La bomba de líquido propelente se enciende con demasiada frecuencia. Sin que cambie de estado el MONITORING ROD equipo para
			4 Falla del WIPER RING (933.021.140)	Desgaste	Pase del líquido propelente a la cámara del power end. Aceites se contaminan (iso 320 vs iso 25). Variación de la viscosidad de los aceites.
			5 Aire en la cámara del líquido propelente		Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba esta en marcha. Alarma de "3 minute filling valve" "válvula de llenado 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI. La bomba de líquido propelente se enciende con demasiada frecuencia. Sin que cambie de estado el MONITORING ROD
			6 La válvula de drenaje tiene fugas		La bomba de líquido propelente se enciende con demasiada frecuencia.
			7 La válvula de no retorno en la tubería entre la válvula de vaciado y el deposito de líquido propelente está bloqueada o dañada	Desgaste	Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba esta en marcha. Alarma de "3 minute filling valve" "válvula de llenado 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI.
			8 Fugas por SET ROOF SHAPED RINGS (933.160.401) o fugas internas por elastómeros	Desgaste	Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba esta en marcha. Alarma de "3 minute filling valve" "válvula de llenado 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI. La bomba de líquido propelente se enciende con demasiada frecuencia. Sin que cambie de estado el MONITORING ROD
			9 Fuga en las NON- RETURN VALVE (853.010.259)	Desgaste	El DIAPHRAGM (824.100.001) golpea la pared trasera del DIAPHRAGM HOUSING (824.100.001). Deterioro y posterior rotura de DIAPHRAGM (824.100.001). Alarma de "3 minute filling valve" "Válvula de llenado de 3 minutos" si el monitoring rod no cambia de estado, se detiene el equipo por protección. (Demasiadas señales de llenado mientras la bomba esta encendida). El desgaste de las non return valve corresponde a la presencia de aereación en el sistema hidráulico. La cavitación origina sobre trabajo y desgaste prematuro en las non return valve (NPSHR 400 kPa)
	D	Alto volumen de nivel de liquido propelente en el diafragma	1 Falla válvula 2/2 de drenaje de líquido propelente (853.010.241)	Desgaste	Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba esta en marcha. Alarma de "3 minute drain valve" "válvula de drenaje 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI. Sin que cambie de estado el MONITORING ROD equipo para
			2 Falla válvula 3/2 que controla la válvula 2/2 de drenaje de líquido propelente (972.200.065)	Desgaste	Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba esta en marcha. Alarma de "3 minute drain valve" "válvula de drenaje 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI. Sin que cambie de estado el MONITORING ROD (832.101.209) equipo para
	E	Variación del recorrido de los limites del diafragma MONITORING ROD (832.101.209)	1 Varilla indica fuera de rango de operación		Recorrido de diafragma fuera de límites operacionales. Deterioro de varilla de sensor, Deterioro del sensor. Posible rotura del diafragma
			2 El diafragma tiene fuga		Alarma de "3 minute filling valve" "Válvula de llenado de 3 minutos" en el Panel táctil GEHO HMI. Sin que cambie de estado el MONITORING ROD (832.101.209)
			3 Acumulación de viruta en el MONITORING ROD		Recorrido de diafragma fuera de límites operacionales. El sensor no detecta la posición real del diafragma enviado falsas señales de llenado o vaciado. Alarmas de "3 minute drain valve" o "3 minute filling valve" El DIAPHRAGM (824.100.001) golpea la pared trasera del DIAPHRAGM HOUSING (824.100.001). Deterioro y posterior rotura de DIAPHRAGM (824.100.001).

Fuente: Elaboración propia

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"				Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea "a falta de"
F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4						
1	C	2	S	N	N	S	S						Inspección y/o cambio a condición del bloque de válvulas 2/2	6 meses	Mecánico	La frecuencia se puede variar conforme se avance el plan. Se debe tener un banco de pruebas		
1	C	3	S	N	N	S	S						Inspección y/o cambio a condición del bloque de electro válvulas 3/2	6 Meses	Instrumentación	La frecuencia se puede variar conforme se avance el plan. Se debe tener un banco de pruebas		
1	C	4	S	N	N	S	S						Cambio del Wiper RING	12 Meses	Mecánico	Asegurar el cambio del componente dentro del PM 8000 hras		
1	C	5	S	N	N	S	S						Realizar el purgado del aire por las 6 válvulas de venteo cada 12 horas	Diario	Operaciones			
1	C	6	S	N	N	S	S						Inspección y mantenimiento de la válvula de drenaje	12 Meses	Mecánico	Asegurar el cambio del componente dentro del PM 8000 hras		
1	C	7	S	N	N	S	S						Inspección y mantenimiento de la válvula de no retorno	12 Meses	Mecánico	Asegurar el cambio del componente dentro del PM 8000 hras		
1	C	8	S	N	N	S	S						Realizar pruebas de llenado y vaciado completo del circuito de líquido propelente para detectar posibles fugas x componentes internos, accesorios	3 Meses	Mecánico	Evaluar el comportamiento del sistema de líquido propelente		
1	C	9	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Revisar parámetros operativos de las bombas (Presión de succión por encima de 400 kPa)	Diario	Operaciones	Este sistema evitará la acumulación de aire en el sistema el cual viene dañando los componentes mayores del equipo	Re Diseño	
													Implementar un sistema automático de venteo de aire		Vendor/Ingeniería	Este sistema evitará la acumulación de aire en el sistema el cual viene dañando los componentes mayores del equipo	Re Diseño	
													Solicitar un rediseño de materiales de fabricación de las NON RETURN VALVE		Vendor/Ingeniería			
1	D	1	S	N	N	S	S						Inspección y/o cambio a condición del bloque de válvulas 2/2	6 meses	Mecánico	La frecuencia se puede variar conforme se avance el plan. Se debe tener un banco de pruebas		
1	D	2	S	N	N	S	S						Inspección y/o cambio a condición del bloque de electro válvulas 3/2	6 Meses	Instrumentación	La frecuencia se puede variar conforme se avance el plan. Se debe tener un banco de pruebas		
1	E	1	S	N	N	S	S						Inspección estado de varilla MONITORING ROD	3 Meses	Mecánico			
1	E	2	S	N	N	S	S						Inspección estado del diafragma con videoscopia / Tapones magnéticos	3 Meses	Predictivo		Inspección	
1	E	3	S	N	N	S	S						Revisar y limpiar las limaduras acumuladas en el MONITORIG ROD	3 Meses	Mecánico	La acumulación de material en el monitoring rod causa falsa señal de llenado o vaciado de líquido propelente		
													Contrastar señales de los IGNITOR sensores de posición del MONITORIG ROD	3 Meses	Instrumentación			

Fuente: Elaboración propia

FUNCIÓN	TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)
1 Regula la presión interna de la cámara de los diafragmas	Función Primaria	A No descarga las sobrepresiones	1 SAFETY VALVE (921.300.706) Averiadada / descalibrada	Desgaste	Se genera sobre presiones en la cámara de diafragma. Rotura de los DIAPHRAGM (824.100.001), por consiguiente la contaminación de las cámaras de líquido propelente con pulpa, saturación del filtro de aceite, daño en componentes hidráulicos
		B Perdida de presión	1 NON-RETURN VALVE UNIT (853.010.259) con fuga interna	Desgaste	No retiene el líquido propelente de las cámaras hidráulicas, a causa de esto se tiene constantes señales de llenado de líquido propelente

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Hoja de decisión RCM2 Unidad de Regulación de Límite de Presión

Referencia de información	Evaluación de las consecuencias								Tareas "a falta de"				Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea "a falta de"				
	F	FF	FM	H	S	E	O		H1	H2	H3							H4	H5	S4	
1	A	1	S	N	N	S	S										Cambio / calibración certificada de la SAFETY VALVE (921.300.706)	12 Meses	Mecánico	Asegurar la inclusión de la actividad dentro del PM 8000 hras	
1	B	2	S	N	N	S	S										Inspección / cambio de NON-RETURN VALVE (853.010.259)	6 Meses	Mecánico	El departamento de mantenimiento debe crear esta estrategia con esta frecuencia	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14
AMFE Unidad Power End

FUNCIÓN	TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)
1 Convertir el movimiento rotacional del cigüeñal a movimiento lineal para la unidad pistón	Función Primaria	A No convierte el movimiento de rotación a movimiento lineal para la unidad de pistón	1 Falla del Rodamientos: SPHERICAL ROLLER BEARING (942.900.119), CYL. ROLLER BEARING (942.900.083), CYL ROLLER BEARING (942.900.096)	Sobrecarga	Deterioro de biela: CONNECTING ROD (068.587.004). Sobre esfuerzo e el cigüeñal: CRANKSHAFT (072.587.000), reductor y motor. Deterioro de los componentes internos como: SET ROOF SHAPED RINGS (933.160.370); SET ROOF SHAPED RINGS (933.160.400), y CROSSHEAD ROD (089.587.001). Sobrecalentamiento de la caja de piezas en contacto y aceite de lubricación. Indisponibilidad de bomba.
			2 Falla de CROSSHEAD (839.100.063)	Sobrecarga	Calentamiento de CROSSHEAD GUIDE(090.587.001). Sobresfuerzo CRANKSHAFT (072.587.000), reductor y motor. Indisponibilidad de bomba
			3 Falla de biela: CONNECTING ROD (068.587.004)	Sobrecarga	Deterioro prematuro de: CROSSHEAD (839.100.063), CRANKSHAFT (072.587.000). Desgaste de CROSSHEAD GUIDE(90.533.001),CYL.ROLLER BEARING (090.587.001); y CYL.ROLLER BEARING (942.900.083). Indisponibilidad de bomba
			4 Falla de cigüeñal CRANKSHAFT (072.587.000)	Sobrecarga	Deterioro de biela. Sobresfuerzo en cigüeñal, reductor y motor. Indisponibilidad de bomba Deterioro de los componentes internos como, sello de cilindro, rodamientos y varilla de conexión. Sobrecalentamiento de la caja de rodamientos.
			5 Desgaste excesivo de CROSSHEAD GUIDE(090.587.001)	Desgaste	Deterioro crosshead rod, deterioro de sello U RING (933.101.142) y WIPPER RING (933.021.140)
			6 Perdida de linealidad de CROSSHEAD ROD (839.100.063)	Sobrecarga	Deterioro sellos, sobre esfuerzo de pistón
			7 Falla de HEXAGON BOLT(862.005.417)	Sobrecarga	Perdida de movimiento lineal del PISTON ROD (063.587.006). Fuerte golpeteo en el POWER END Desbalance hidráulico en la bomba Daño en el CONNECTION PIECE (835.900.227) Daño en el THRUST PIECE (841.900.369) Parada del equipo

Fuente: Elaboración propia

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"				Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea a falta de
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4						
1	A	1	S	N	N	S	S							Monitoreo de temperatura y vibración a: SPHERICAL ROLLER BEARING (942.900.119), CYL. ROLLER BEARING (942.900.083), CYL ROLLER BEARING (942.900.096)	Diario	Mecánico		
														Verificar la saturación del filtro de aceite del POWER END	Diario	Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico	Inspección/Check list
														Medición de vibraciones y ultrasonido pasivo	Mensual	Predictivo		
															6 Meses	Mecánico		
1	A	2	S	N	N	S	S							Inspección, verificación de medidas y/o cambio de CROSSHEAD (839.100.063)	12 Meses	Mecánico		
														Verificación de puntos de lubricación de CROSSHEAD GUIDE (090.587.001)	6 Meses	Mecánico		
1	A	3	S	N	N	S	S							Inspección, verificación de medidas y/o cambio de CONNECTING ROD (068.587.004)	12 Meses	Mecánico		
														Verificación de puntos de lubricación	6 Meses	Mecánico		
1	A	4	S	N	N	S	S							Inspección, verificación de medidas y/o cambio de CRANKSHAFT (072.587.000)	12 Meses	Mecánico		
														Ultrasonido, UT, PT al CRANKSHAFT (072.587.000)	12 Meses	Predictivo		
														Verificación de puntos de lubricación	6 Meses	Mecánico		
1	A	5	S	N	N	S	S							Inspección, verificación de medidas y/o cambio de CROSSHEAD GUIDE (090.587.001)	12 Meses	Mecánico		
1	A	6	S	N	N	S	S							Verificación de linealidad de CROSSHEAD ROD (839.100.063)	12 Meses	Mecánico		
1	A	7	S	N	N	S	S							Mandatorio cambio del HEXAGON BOLT(862.005.417)	12 Meses	Mecánico		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17
Hoja de Decisión RCM2 Unidad de Lubricación Power End

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea "a falta de"		
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3						H4	H5
1	A	1	S	N	N	S	S									Verificar el FLOW SENSOR 971.600.008, este siempre se debe mantener en el rango verde en el dial electrónico	Diario	Operador	La condición debe ser registrada en el check list diario de equipo
1	A	2	S	N	N	S	S									Verificar el FLOW SENSOR 971.600.008, este siempre se debe mantener en el rango verde en el dial electrónico	Diario	Operador	La condición debe ser registrada en el check list diario de equipo
1	A	3	S	N	N	S	S									Verificar el indicador de saturación del filtro de descarga, este debe permanecer en color verde.	Diario	Operador	La condición debe ser registrada en el check list diario de equipo.
																Cambio de filtro de aceite.	Anual	Mecánico	
1	A	4	S	N	N	S	S									Verificar el nivel de aceite el indicador de aceite del Power End.	Diario	Operador	La condición debe ser registrada en el check list diario de equipo.
																Verificar el indicador de presión diferencial.	Diario		
																Verificar la presión el en Pressure Gauge 921.510.400	Diario		
1	A	5	S	N	N	S	S									Cambio de Filter Element (921.700.872) , si la presión de vacío está entre -0.7 y -1 bar, se debe cambiar inmediatamente el filtro.	Diario	Operador	La condición debe ser registrada en el check list diario de equipo.
1	B	1	S	N	N	S	S									Análisis de aceite.	6 meses	Confiabledad Lubricador	
																Cambio de aceite.	12 meses		
1	C	1	S	N	N	S	S									Verificar la posición de la válvula	Diario	Operador	
1	C	2	S	N	N	S	S									Inspeccionar la válvula y los conectores	Diario	Operador	
1	C	3	S	N	N	S	S									Verificar el FLOW SENSOR 971.600.008, este siempre se debe mantener en el rango verde en el dial electrónico	Diario	Operador	La condición debe ser registrada en el check list diario de equipo
1	D	1	S	N	N	S	S									Verificar la temperatura del aceite.	Diario	Operador	
																Inspección y/o cambio HEAT ELEMENT 971.900.047	12 meses		Electricista

Fuente: Elaboración propia

FUNCIÓN		TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)
1	Contener el diafragma, separando el líquido propelente y la pulpa	Función Primaria	A Mezcla de líquidos	1 Ruptura del DIAPHRAGM (824.100.001)	Fatiga	Contaminación del sistema de líquido propelente (aceite y pulpa). Puede causar ruido de golpeteo en la cámara de la bomba durante el recorrido de descarga. Demasiadas actividades de la válvula de llenado mientras la bomba está en marcha.
2	Contiene líquido propelente sin aire para amortiguar el diafragma		A Aire en la cámara del líquido propelente	1 No se realiza el purgado de aire por NEEDLE VALVE (921.050.001)	Error humano	Golpeteo en las válvulas cónicas. Rotura de DIAPHRAGM (824.100.001), DIAPHRAGM HOUSING (045.109.001) de la cámara de lodos.
			B Fuga de líquido propelente	1 NEEDLE VALVE (921.050.001) y cañerías en mal estado	Desgaste	Excesiva actividades de la válvula de llenado de líquido propelente en alojamiento de diafragma. Deterioro del DIAPHRAGM (824.100.001).
3	Recorrido del diafragma entre los Initiator		A No detecta desviación de recorrido	1 Falla lectura IGNITIATOR (858A101A050) y MONITORG ROD (832.101.209)	Desgaste	No existe control de posición del diafragma, no se regula el volumen del líquido propelente en la cámara. No obedece el ciclo de testeo (control de llenado y vaciado de líquido propelente). Para bomba .Rotura de DIAPHRAGM (824.100.001) Ciclo de testeo (60
			B No detecta desviación de recorrido	1 Acumulación de limaduras en el MONITORING ROD	Desgaste / Contaminación	No existe control de posición del diafragma, no se regula el volumen del líquido propelente en la cámara. No obedece el ciclo de testeo (control de llenado y vaciado de líquido propelente). Para bomba .Rotura de DIAPHRAGM (824.100.001)
			C Recorrido fuera del rango establecido	1 Desincronización de recorrido del DIAPHRAGM ((824.100.001)	Desgaste / Contaminación	Rotura del DIAPHAGM (824.100.001), bombeo inadecuado

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19

Hoja de Decisión RCM2 Unidad Alojamiento de Diafragma

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea "a falta de"
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3					
													Verificación de la presión de descarga	Diaria	Operaciones	Dar notificación de los hallazgos	Check list
1	A	1	S	N	N	S	S						Durante el purgado de aire, verificar contaminación de aceite con pulpa	Diaria	Operaciones	Dar notificación de los hallazgos	Check list
2	A	1	S	N	N	S	S						Drenado de aire 1 vez por tuno	2 x Día	Operaciones		Check list
2	B	1	S	N	N	S	S						Inspección de líneas hidráulicas	Diaria	Operaciones	Dar notificación de los hallazgos	Check list
2	B	1	S	N	N	S	S						Visualizar por las mangueras transparentes el drenado de aceite y aire para validar el estado de la NEEDLE VALVE	Diaria	Operaciones	Dar notificación de los hallazgos	Check list
3	A	1	S	N	N	S	S						Verificar la posición del MONITORIG ROD en función al INICIATOR. Utilizando del HMI verificar si se activa el ciclo de testeo sistema hidráulico establecido.	Diaria	Operaciones	Dar notificación de los hallazgos	Check list
3	B	1	S	N	N	S	S						Realizar limpieza periódica de MONITORING ROD	3 meses	Mantenimiento		
3	B	1	S	N	N	S	S						Realizar videoscopia buscando integridad del MONITORING ROD	3 Meses	Predictivo		
3	C	1	S	N	N	S	S						Verificar la posición del MONITORIG ROD en función al INICIATOR. Utilizando del HMI verificar si se activa el ciclo de testeo sistema hidráulico establecido.	Diaria	Operaciones	Dar notificación de los hallazgos	
3	C	1	S	N	N	S	S						Verificar el flujo de bombeo con respecto a su velocidad	Diaria	Operaciones	Dar notificación de los hallazgos	

Fuente: Elaboración propia

FUNCIÓN	TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)
1 Apertura y cierre para el transporte de relave a bombear	Función Primaria	A Apertura o cierre parcial de Conical Valve	1 Obturación parcial de Conical Valve 831.350.358 y 831.150.998 de succión o descarga	Suciedad	Excesiva vibración y ruido durante el recorrido de descarga del diafragma. Golpeteo en las válvulas de succión y/o descarga. Deterioro del valve housing y conjunto de válvulas. Ruido de martilleo en puntos muertos del diafragma.
			2 Obturación parcial de Conical Valve 831.350.358 y 831.150.998 de succión o descarga	Suciedad	Desgaste prematuro de los componentes válvulas cónicas acompañadas con ruido.
			3 Desgaste de Valve Ring, Valve seat en la succión o descarga	Desgaste	Ruido de martilleo en los punto muertos del diafragma. Deterioro de valve housing, conjunto de válvula, clamping piece y guide bush.
			4 Desgaste de Conical Valve 831.350.358 y 831.150.998, Guide Bush 831.900.967, Compresión Spring 825.107.067 de succión o descarga	Desgaste	Ruido de martilleo en los punto muertos del diafragma. Deterioro de valve housing, conjunto de válvula, clamping piece y guide bush.
		B Deformación de conjunto Conical Valve	1 Conical Valve 831.350.358 y 831.150.998 trabada	Sobrecarga	Ruido de martilleo en los punto muertos del diafragma. El conjunto válvula cónica sufre deformación debido al impacto haciendo que esta se trabe, aun que esta este sin desgaste se debe cambiar.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21

Hoja de decisión RCM2 Unidad de Válvula Cónica

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea "a falta de"
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4					
1	A	1	S	N	N	S	S						Realizar la inspección de los componentes en operación, verificando que no existan ruidos extraños en el conjunto valve housing	Diario	Operaciones	Ultrasonido pasivo	Inspección
1	A	2	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Implementación de sistema de monitoreo de desgaste de componentes ultrasónico		Mecánico / Ingeniería	Instalación de dispositivo de monitoreo en línea	Rediseño
													Implementación de strainer en la línea de succión de las bombas gehu y/o screen en Tranfer Box de línea		Mecánico / Ingeniería	Permitirá remover material Oversize fuera de rango operativo	Rediseño
1	A	3	S	N	N	S	S						Inspección de valve ring 831.700.935; Seat valve 831.150.998, en la succión y descarga	Mensual	Mecánico	Cuantificar el desgaste y llevar el control para establecer nuevas frecuencias de inspección	Inspección
1	A	4	S	N	N	S	S	N	N				Inspección de Conical valve 831.350.358; Guide valve 831.900.967, Compression spring 825.107.067 de succión y descarga	Mensual	Mecánico	Cuantificar el desgaste, medir la altura del Compression spring y llevar el control para establecer nuevas frecuencias de inspección	Inspección
1	B	1	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Realizar la prueba de nuevos diseños tanto de materiales como de perfil de las Cone valve, o probar válvulas con el mismo desempeño pero más económicas de otro proveedor local o internacional		Mecánico	Se puede realizar pruebas con el vendor o con otros representantes de empresas que evidencien experiencia en este tipo de equipos	Rediseño

Fuente: Elaboración propia

FUNCIÓN		TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)		
1	El amortiguador de pulsaciones reduce las variaciones de presión en la línea de descarga. De este modo se mantiene un flujo estable y constante en la línea de descarga. Nitrógeno Regulado a una presión que varía según la presión de descarga	Función Primaria	A	Baja Presión <30% de presión de línea descarga.	1	Se produce pulsaciones de presión excesivas y vibraciones fuertes.	Caja Negra	Vibración general de quipo. Vibración general del sistema. Picos de presión a la frecuencia de descarga de la bomba
					2	Fuga de nitrógeno	Desgaste	Bajo nivel de Nitrógeno. Rotura de DIAPHRAGM (824.040.008) Ingreso de pulpa a la cámara de nitrógeno y cañerías Pérdida de nitrógeno en la cámara
			B	Alta Presión >80% de presión de línea descarga	1	Se produce un martilleo del DIAPHRAGM (824.040.008) contra la base del amortiguador.	Error humano de otros	Se produce un desgaste y daños en el DIAPHRAGM y PULSATION DAMPENER BODY Vibración general de quipo. Vibración general del sistema. Picos de presión a la frecuencia de descarga de la bomba
			C	Rotura de diafragma de DAMPENER	1	Fatiga del elastómero,	Desgaste	Vibración general de quipo. Vibración general del sistema. Picos de presión a la frecuencia de descarga de la bomba Pérdida de nitrógeno en la cámara
		D	No reduce las pulsaciones del sistema	1	Vibración de tuberías y accesorios Vibración de la máquina	Caja Negra	Fatiga de los componentes, tuberías, pernos, estructuras metálicas. Fatigas de cimentación y pernos de anclaje.	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23

Hoja de Decisión RCM2 Unidad Dampener

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"				Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea "a falta de"
F	FF	FM	H	S	E	O	O1	O2	O3	H4	H5	S4						
1	A	1	S	N	N	S	S							Verificación de la presión de la línea de descarga	Diario	Operador		
														Verificación de la presión de nitrógeno del DAMPENER	Diario	Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico	
1	A	2	S	N	N	S	S							Verificación de la presión de nitrógeno del DAMPENER	Operador	Operador		Notificar la condición encontrada a mecánico
														Verificar fugas de Nitrógeno por las líneas de llenado	Operador	Operador		
1	B	1	S	N	N	S	S							Verificación de la presión de la línea de descarga	Diario	Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico	
														Verificación de la presión de nitrógeno del DAMPENER	Diario	Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico	
														Evaluación del PULSATION DAMPENER BODY	12 Meses	Mecánico	Controlar desgaste	
1	C	1	S	N	N	S	S							Verificación de la presión de la línea de descarga	Diario	Operador		Notificar la condición encontrada a mecánico
														Verificación de la presión de nitrógeno del DAMPENER	Diario	Operador		
1	D	1	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Implementar el control automático de llenado y vaciado de nitrógeno en función de la presión de la línea de descarga CPDS		Ingeniería		Rediseño

Fuente: Elaboración propia

FUNCIÓN		TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)
1	Llenado y retención del nitrógeno en el dampener	Función Primaria	A No tiene presión o está por debajo de lo especificado	1 Deterioro de GLOBE VALVE (921.100.036)	Desgaste	Ruido de martilleo cerca o justo detrás del recorrido medio. Cae la presión indicada en el manómetro
				2 Fuga de nitrógeno por cañerías y acoples	Desgaste	Ruido de martilleo cerca o justo detrás del recorrido medio. Cae la presión indicada en el manómetro
				3 Falta de amortiguamiento	Desgaste	Vibración y pulsación hidráulica en el sistema

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Hoja de Decisión RCM2 Unidad de Llenado de Dampener

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				Tareas "a falta de"			Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea "a falta de"		
F	FF	FM	H	S	E	O	H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3						H4	H5
1	A	1	S	N	N	S	S						Inspección / cambio de GLOBE VALVE (921.100.036)	12 Meses	Mecánico	Notificar la condición encontrada a mecánico
1	A	2	S	N	N	S	S						Inspección y verificación de fugas	Diario	Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico
1	A	3	S	N	N	S	S						Inspección de la presión seteadada en el DAMPENER según el punto de descarga	Diario	Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico

Fuente: Elaboración propia

FUNCIÓN		TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)
1	Trasladar la pulpa a alta presión desde las bombas hasta su deposición en la presa de relaves.	Función Primaria	A Fuga de pulpa por manifold	1 Fisura por fatiga causada por vibración (sistema amortiguador no absorbe la pulsación)	Caja Negra	Fuga de pulpa a alta presión puede dañar a personas y equipos. Fuga de pulpa que impacta el medio ambiente
			B Fuga de pulpa por spools o tubería	1 Fisura por fatiga causada por vibración (sistema amortiguador no absorbe la pulsación)	Caja Negra	Fuga de pulpa a alta presión puede dañar a personas y equipos. Fuga de pulpa que impacta el medio ambiente
			C Soltura de pernos de brida	1 Soltura de pernos por vibración (sistema amortiguador no absorbe la pulsación)	Movimiento	1 o más pernos sueltos pueden generar fuga de carga por la brida y/o dañar las empaquetaduras
			C Fuga de pulpa por manifold	1 Desgaste por abrasión	Desgaste	Fuga de pulpa a alta presión puede dañar a personas y equipos. Fuga de pulpa que impacta el medio ambiente
			D Fuga de pulpa por spools o tubería	1 Desgaste por abrasión	Desgaste	Fuga de pulpa a alta presión puede dañar a personas y equipos. Fuga de pulpa que impacta el medio ambiente
E Tubería o manifold obstruido	1 Arenamiento de material en la línea (baja velocidad de fluido, alto % de sólido)	Error humano de otros	Incremento de presión en la tubería, trip por alta presión			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27

Hoja de decisión RCM2 Manifold y Tuberías de Transporte Alta Presión

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea a falta de			
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3						H4	H5	S4
1	A	1	S	N	N	S	S										Verificación de la presión de la línea de descarga	Diario	Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico
1	A	2	S	N	N	S	S										Verificación de la presión de nitrógeno del DAMPENER Verificación de la presión de nitrógeno del DAMPENER	Diario Operador	Operador Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico
1	B	1	S	N	N	S	S										Verificar fugas de Nitrógeno por las líneas de llenado Verificación de la presión de la línea de descarga	Operador Diario	Operador Operador	Notificar la condición encontrada a mecánico
1	C	1	S	N	N	S	S										Verificación de la presión de nitrógeno del DAMPENER Evaluación del PULSATION DAMPENER BODY	Diario 12 Meses	Operador Mecánico	Notificar la condición encontrada a mecánico Controlar desgaste
1	D	1	S	N	N	S	S										Monitoreo de espesores	6 meses	Predictivo	Notificar la condición encontrada
1	E	1	S	N	N	S	S										Monitoreo de espesores Verificación de la presión de la línea de descarga Verificación de la presión de nitrógeno del DAMPENER	6 meses Diario Diario	Predictivo Operador Operador	Notificar la condición encontrada Notificar la condición encontrada a mecánico

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28

AMFE Cimentación y Anclaje

FUNCIÓN	TIPO DE FUNCIÓN	FALLO FUNCIONAL	MODO DE FALLA (CAUSA DE LA FALLA)	TIPO DE MODO FALLA	EFFECTOS DE LAS FALLAS (QUÉ SUCEDE CUANDO FALLÓ)
1 Transmitir las cargas dinámicas al suelo distribuyéndolas de forma que no superen su presión admisible.	Función Primaria	A No trasmite la carga dinámica al suelo	1 Fisuras en la integridad de concreto	Movimiento	Vibración del equipo, fatiga de componentes mecánicos, rotura de tuberías
			2 Rotura de los pernos de anclaje	Movimiento	Vibración del equipo, fatiga de componentes mecánicos, rotura de tuberías
			3 Soltura de pernos de fijación	Movimiento	Vibración del equipo, fatiga de componentes mecánicos, rotura de tuberías
			4 Corrosión de pernos de fijación	Movimiento	Vibración del equipo, fatiga de componentes mecánicos, rotura de tuberías

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29
 Hoja de decisión RCM2 Cimentación y Anclaje

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Tareas "a falta de"			Tarea a realizar	Frecuencia inicial	A realizar por	Comentarios / Observaciones	Tipo de tarea "a falta de"
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3					
1	A	1	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Rediseñar la cimentación a las condiciones actuales de trabajo		Ingeniería	Realzar la reparación e upgrade de la cimentación para el power end y bomba	Rediseño
1	A	2	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N	Rediseñar la cimentación a las condiciones actuales de trabajo		Ingeniería	Realzar la reparación e upgrade de la cimentación para el power end y bomba	Rediseño
2	A	3	S	N	N	S	S						Realizar UT a los pernos para confirmar su estado	06 Meses	Predictivo	Entregar información a ingeniería	
													Realizar el torqueo de pernos según su especificación		Mecánico	Utilizar tabla de torqueo de pernos estandarizada	
														06 Meses			
3	A	4	S	N	N	S	S						Proteger los pernos de la base y de la estructura utilizando inhibidores de corrosión	06 Meses	Mecánico		

Fuente: Elaboración propia

Sistema	Capex ¿? Para implementar	Actividad	Responsable	Frecuencia	Estrategia a implementar o incluir
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Inspección / cambio de válvula 2/2	Mecánico - Eléctrico	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Sistema Unidad de Líquido Propelente	Si	Fabricación o compra de módulo para pruebas de válvulas 2/2	Ingeniería	-	Gestionar proyecto inversión
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Inspección / cambio de válvula 3/2	Instrumentista	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Cambio del Wiper Ring	Mecánico	12 meses	Incluir en PM 8000 hras
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Realizar purgado de aire por válvulas de venteo	Operador	1 x turno	Incluir en check list operativo
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Cambio de válvula de drenaje	Mecánico	12 meses	Incluir en PM 8000 hras
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Cambio de válvula non return	Mecánico	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Realizar pruebas de llenado y vaciado completo del circuito de líquido propelente	Mecánico	3 meses	Crear nueva estrategia
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Revisar parámetros operativos de las bombas (Presión de succión por encima de 400 kPa)	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Sistema Unidad de Líquido Propelente	Si	Implementar un sistema de purga automático del sistema de líquido propelente	Ingeniería - Vendor	-	Gestionar proyecto inversión
Sistema Unidad de Líquido Propelente	Si	Rediseño de las Non Return Valve	Vendor	-	Gestionar proyecto inversión
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Inspección estado de varilla Monitoring Rod	Mecánico	3 meses	Crear nueva estrategia
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Inspección del estado del diafragma por videoscopia	Predictivo	3 meses	Crear nueva estrategia
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Contrastar señales de los Rod Ignitors	Instrumentista	3 meses	Crear nueva estrategia
Sistema Unidad de Líquido Propelente	No	Instalación de tapones magnéticos en los circuitos hidráulicos	Predictivo	3 meses	Crear nueva estrategia
Unidad de regulación de límite de presión	No	Cambio de válvula Relief en pm 8000 Hras	Mecánico	12 meses	Incluir en PM 8000 hras
Unidad Power End	No	Monitoreo de Temperatura de rodamientos y vibración	Predictivo	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad Power End	No	Verificar la saturación de filtro de aceite	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad Power End	No	Medición valores de ultrasonido pasivo	Predictivo	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Unidad Power End	No	Verificar puntos de lubricación en power end, rodamientos, Cross head, cigüeñal	Mecánico	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Unidad Power End	No	Ultra sonido y líquidos penetrantes a componentes de cigüeñal	Predictivo	12 meses	Incluir en PM 8000 hras
Unidad Power End	No	Cambio mandatorio del Hexagon Bolt (865.005.417)	Mecánico	12 meses	Incluir en PM 8000 hras
Unidad de lubricación del Power End	No	Verificar el rango activo del Flow Sensor	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad de lubricación del Power End	No	Verificar el indicador de saturación del filtro de líquido propelente	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad de lubricación del Power End	No	Verifica el nivel de aceite	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad de lubricación del Power End	No	Análisis de aceite del líquido propelente	Predictivo	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Unidad de lubricación del Power End	No	Inspeccionar fugas de sistema de lubricación	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad de lubricación del Power End	No	Cambio de Heat Element	Electricidad	12 meses	Incluir en PM 8000 hras
Unidad de Alojamiento de Diafragma	No	Verificación de presión de descarga y presión de nitrógeno del dampener	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad de Alojamiento de Diafragma	No	Verificar si hay presencia de pulpa por la líneas de purgado de líquido propelente	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad de Alojamiento de Diafragma	No	Verificar la posición del MONITORIG ROD en función al INICIATOR HDMI se activa o no ciclo de testeo automático	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad de Alojamiento de Diafragma	No	Realizar videoscopia buscando al integridad del monitoring rod	Predictivo	3 meses	Crear nueva estrategia
Unidad Válvula Cónica	No	Inspeccionar componentes con ultrasonido pasivo	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad Válvula Cónica	Si	Implementar sistema de monitoreo ultrasónico automatizado	Ingeniería - Vendor	-	Gestionar proyecto inversión
Unidad Válvula Cónica	Si	Implementar strainer de en línea de succión común de todas las bombas Geho	Ingeniería - Vendor	-	Gestionar proyecto inversión
Unidad Válvula Cónica	No	Inspeccionar de válvula cónica, verificación de desgaste	Mecánico	1 Mes	Crear nueva estrategia
Unidad Válvula Cónica	Si	Probar nuevos diseños de válvulas cónico con nuevos materiales o un su defecto probar válvulas con el mismo rendimiento pero más económicas	Mecánico	-	Gestionar proyecto inversión
Unidad Dampener	No	Verificar presión de llenado de nitrógeno adecuado para la presión de descarga de la bomba	Operador	Diario	Incluir en check list operativo
Unidad Dampener	No	Evaluación de desgaste del Pulsation Dampener Body	Mecánico	12 meses	Incluir en PM 8000 hras
Unidad Dampener	Si	Implementar el control automático de llenado y vaciado de nitrógeno en función de la presión de la línea de descarga CPDS	Ingeniería - Vendor	-	Gestionar proyecto inversión
Unidad de Llenado de Nitrógeno	No	Cambio de la Globe Valve de llenado de nitrógeno al dampener	Mecánico	12 meses	Incluir en PM 8000 hras
Tuberías Líneas de Descarga Alta Presión	No	Monitoreo de espesores de manifold	Predictivo	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Tuberías Líneas de Descarga Alta Presión	No	Monitoreo de espesores de spools y tuberías	Predictivo	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Cimentación	Si	Rediseño de las cimentaciones a las condiciones actuales de trabajo	Ingeniería	-	Gestionar proyecto inversión
Cimentación	No	Ultra sonido a pernos estructurales de la cimentación de todo el conjunto de las bombas y cimentaciones de soporte de tuberías	Predictivo	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Cimentación	No	Verificar el torque o de pernos de cimentación a especificación	Mecánico	6 meses	Incluir en PM 4000 hras
Cimentación	No	Proteger los pernos de cimentación con inhibidores de corrosión	Mecánico	6 meses	Incluir en PM 4000 hras

Fuente: Elaboración propia

Se ha elaborado la tabla 30, donde se resume las acciones a tomar luego del desarrollo de la implementación del RCM2 para la estación de bombas GEHO, en ella se puede identificar actividades que se deben de incluir dentro de las actuales estrategias de mantenimiento preventivo PM de 4000 y 8000 horas tanto para las actividades desarrolladas por los departamentos mecánicos y eléctricos.

También se identifica actividades nuevas, por las cuales se deben crear nuevas estrategias de mantenimiento siendo enfocadas a su realización cada 3 meses y deberán ser desarrolladas por las áreas de mantenimiento predictivo, mantenimiento mecánico y mantenimiento eléctrico.

Así mismo se identifican actividades de verificación diaria o por turnos de trabajo orientadas hacia el departamento de operaciones, estas deben ser implementadas en un check list o lista de verificación operativa y debe ser controlada por la supervisión para reportar las desviaciones encontradas y para la posterior generación de avisos de mantenimiento en el ERP.

Lo más resaltante, es que se evidencia cuáles son los proyectos que requieren un CAPEX para la implementación ya que demandaría una inyección de capital.

3.2.4. Resultados del análisis de la disponibilidad mecánica luego de la implementación de RCM2

Para realizar el análisis de la disponibilidad en el nuevo contexto de implementación de RCM2, se calculan los nuevos indicadores siendo excluidas todas aquellas detenciones relacionadas con las mejoras que serán implementadas, obteniendo un promedio de 95.6%, cumpliendo el objetivo esperado. En este nuevo escenario se considera un

pequeño porcentaje de detención atribuido a la variabilidad operativa a causa de la complejidad del mineral procesado siendo ésta un 7% adicional en cada unidad.

Tabla 31 Disponibilidad de la Estación de Bombas GEHO 2019 Luego de la Implementación del RCM2

Equipo	Descripción de equipo	Tiempo de inactividad	Horas Operadas	N# de Fallos	MTTR	MTBF	Disponibilidad
1002063	BOMBA GEHO PP-048	350	8290	30	11.67	276.33	95.9%
1002062	BOMBA GEHO PP-049	403	8237	58	6.95	142.02	95.3%
1002061	BOMBA GEHO PP-050	355	8285	59	6.02	140.42	95.9%
1002060	BOMBA GEHO PP-051	418	8222	41	10.20	200.54	95.2%
1002059	BOMBA GEHO PP-052	382	8258	52	7.35	158.81	95.6%
1002058	BOMBA GEHO PP-054	452	8188	19	23.79	430.95	94.8%
1002057	BOMBA GEHO PP-055	365	8275	24	15.21	344.79	95.8%
1002056	BOMBA GEHO PP-056	352	8288	29	12.14	285.79	95.9%
1002055	BOMBA GEHO PP-057	261	8379	24	10.88	349.13	97.0%
1002054	BOMBA GEHO PP-058	426	8214	48	8.88	171.13	95.1%
Valor Promedio (10 Bombas GEHO)		376.4					
Horas Base de Operación (360 días)		8640				Promedio	95.6%
Total inactividad		3764					

Fuente: Elaboración propia

3.2.5. Indicadores de gestión de mantenimiento luego de la implementación RCM2

Luego de la implementación del RCM2, se recomienda agregar 280 actividades de mantenimiento preventivo a las existentes teniendo un total de 700, así mismo se recomienda agregar 120 actividades predictivas alcanzando 395 tareas predictivas a implementar en la estación de bombas geho para asegurar que la disponibilidad se alcance 95%.

Se estiman realizar 286 actividades correctivas las cuales estarán asociadas a cambios de válvulas cónicas por desgaste normal, considerando una expectativa de vida de 2000

h haciendo un total de 260 atenciones correctivas de cambios más un 10% adicional planeado como contingencia. En efecto se ve la reducción de actividades correctivas que impactan la disponibilidad de los equipos.

Tabla 32
Porcentaje de Tareas Preventivas, Predictivas y Correctivas Realizadas Implementado RCM

Datos	Valor
Total de Tareas Preventivas Realizadas	700
Total de Tareas Predictivas Realizadas	395
Total de Tareas Correctivas Realizadas + 10%	286
Total Tareas Mantenimiento Realizadas	1381
% de Tareas Preventivas Realizadas	50%
% de Tareas Predictivas Realizadas	29%
% de Tareas Correctivas Realizadas	21%

Fuente: Elaboración propia

Para el área de mantenimiento podemos notar que como resultado de la implementación de más tareas preventivas se evidencia el incremento de las horas hombre a requerir, pero estas horas hombre requeridas serán redistribuidas ya que el porcentaje de horas hombre requeridas para trabajos correctivos disminuirá a 26%, así mismo, además se re direccionará las horas hombre que se utilizan para el apoyo mecánico a otras áreas.

Con esto no se requiere la contratación adicional de personal de mantenimiento para cumplir los objetivos del RCM2 a implementar.

Tabla 33
Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Correctivas y Preventivas Implementando RCM

Datos	Valor
H-H de Mantenimiento disponible 3 Mecánicos, 12 horas, 360 días	12960
Horas que se deriva personal a otras áreas	2471
Horas en Tareas Correctivas	3353
Horas en Tareas Preventivas	7136
<hr/>	
% horas en actividades Preventivas	55%
% horas en actividades Correctivas	26%
% horas otras Áreas	19%

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, en el caso del equipo de mantenimiento predictivo ya que las actividades fueron incrementas en 120, y que para este escenario se ejecutarían 395 actividades demandando 947 horas de trabajo especializado. En este caso se requiere incrementar la cantidad de horas disponibles para el mantenimiento predictivo tal y como se puede apreciar en la tabla 34, ya sea haciendo una redistribución de carga laboral o sustentando una contratación de personal o nuevo o contrato tipo marco, para cumplir con los objetivos establecidos.

Tabla 34

Porcentaje Mano de Obra Utilizada en Tareas Predictivas Implementando RCM

Datos	Valor
H-H de Mantenimiento disponible 2 Mpd, 3 horas, 90 días	810
Horas en Tareas Predictivas	947
% de uso H-H en actividades predictivas	117%

Fuente: Elaboración propia

3.3. Análisis de viabilidad económica de la implementación de RCM2

Para poder comprender el impacto financiero que sucede cuando implementamos el RCM2 en la estación de bombas GEHO de la (EM) debemos conocer las variables que determinan el costo unitario de producción y las ventas netas que se generan en un periodo dato, vamos a trabajar con promedios de los BUDGET ya que existen valores que cambian progresivamente según el estudio del yacimiento minero, estas están relacionadas con la ley de Cu, % de recuperación, % de contaminantes, dureza del mineral; con estas variable se calculan los indicadores productivos y estos a su vez tiene impacto en el cobre fino que se vende.

Uno de las principales KPI's es el mineral molido que se pasa a través del molino SAG, este indicador es fundamental para el medir de manera global cuál es el estado de planta ya que si este valor de throughput cae representa problemas de alguna naturaleza en el circuito.

Es por ello que la disponibilidad de las bombas GEHO, repercute en la utilización del molino SAG, ya que, si existe un problema de evacuación de las colas, se sobrecarga los circuitos y por ellos el molino SAG debe bajar su régimen de trabajo.

Se ve la necesidad de realizar la inversión por un valor global de \$ 4'619,000 en la compra e implementación de activos capitalizables.

Tabla 35
Tabla CAPEX Costos de Capital

CAPEX	Motivo	Costo de inversión
Fabricación o compra de módulo para pruebas de válvulas 2/2	Verificar válvulas 2/2	\$20,000.00
Implementar un sistema de purga automático del sistema de líquido propelente	Asegurar el venteo automático	\$150,000.00
Rediseño de las Non Return Valve	-	\$60,000.00
Implementar sistema de monitoreo ultrasónico automatizado	Evitar daños en valve housing	\$670,000.00
Implementar strainer de en línea de succión común de todas las bombas Geho	Reducir consumos de válvulas cónicas	\$2,224,000.00
Probar nuevos diseños de válvulas cónico con nuevos materiales o un su defecto probar válvulas con el mismo rendimiento pero más económicas	-	\$0.00
Implementar el control automático de llenado y vaciado de nitrógeno en función de la presión de la línea de descarga CPDS	Evitar fractura de manifolds y spool	\$955,000.00
Rediseño de las cimentaciones a las condiciones actuales de trabajo	Evitar daños en componentes generales	\$600,000.00
	Total	\$4,679,000.00

ROI Retorno de la Inversión

$$ROI = \frac{\text{Beneficio} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}}$$

Ecuación 9

Tabla 36
Datos para Cálculo de Inversión

Descripción	Unidad
Costo Unitario Operaciones + Mantenimiento \$/t molida	\$7.65
Costo Planta Operaciones + Mantenimiento \$/t Cu fino	\$1,631.19
Costo Mina Operaciones + Mantenimiento \$/t Cu fino	\$991.27
Costo Comercial \$/t Cu fino	\$375.30
Costo Soporte \$/t Cu fino	\$516.36
Costo Financiero \$/t Cu fino	\$633.40
Grade Cu %	20.26%
Price Cu \$/Ton	\$5,835.00
Horas de operación de circuito Molino SAG	24.00
6.1% Disponibilidad en hras objetivo a incrementar	5270.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37
Cálculo ROI Retorno de la Inversión

Descripción	Unidad
Mineral Molido por SAG Ton/día	115200.00
Concentrado de Cu Ton /día	2666.67
Cu Ton/día	540.27
Oportunidad de ventas Cu \$	\$3,152,456.00
Costo Operaciones Planta + Mantenimiento	-881,280.00
Costo Operaciones Mina + Mantenimiento Mina	-535,552.21
Costo Comercial	-202,764.14
Costo Soporte	-278,973.69
Costo Financiero	-342,204.91
Utilidad Bruta x Día	\$911,681.05
Utilidad Generada x hora Operación de 1 Bomba Geho (10% de Línea Productiva)	\$3,798.67
Descripción	Unidad
Beneficio x incremento de disponibilidad	\$20,020,515.76
Inversión del Proyecto	\$4,679,000.00
ROI	3.28

Fuente: Elaboración propia

Realizando el cálculo de Retorno de la inversión de los equipos capitalizables se establece que el margen de retorno de inversión es de \$ 3.28 por dólar invertido; siendo este satisfactorio para el desarrollo del proyecto de capitalización de activos

Tabla 38
Estructura de Costos

Estructura de Costos
Costo Operaciones Planta + Mantenimiento \$/t Cu fino
Payroll
Reactivos (cal, reactivos, etc)
Repuestos
Servicios mantenimiento, operaciones
Energía
Costo Operaciones Mina + Mantenimiento \$/t Cu fino
Payroll
Repuestos
Voladura
Servicios mantenimiento, operaciones
Ferreyros
Costo Comercial \$/t Cu fino
Traslado mineral
Almacenamiento
Alquileres
Transporte de mineral al extranjero
Costo Soporte \$/t Cu fino
Protección Empresarial
Tecnología de la Información
Servicios Generales
Unidad Médica
Transporte de Personal
Comunidades
Costo Financiero \$/t Cu fino
Pago Interés
Pago Impuestos
Devolución de capital
Gastos administrativos

Fuente: Elaboración propia

Se elabora una tabla en la cual se consideran los componentes de cambio y servicios contratados que se realizaron en el periodo 2019 estos suman un monto de \$14'487,200 estos costos pueden ser evitados si se realiza la inversión en los proyectos de capital y la implementación de las actividades recomendadas de RCM2.

Tabla 39
Costo Evitado de Mantenimiento Implementando RCM2

Costo Evitado de Mantenimiento Implementando RCM2				
Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio	
Cambio de válvulas cónicas \$5600	717	5600	\$	4,015,200
Cambio de rodamientos de cigüeñal y componentes x daño	8	220000	\$	1,760,000
Cambio de un cigüeñal spare	1	950000	\$	950,000
Cambio de spools	5	15000	\$	75,000
Cambio de manifold de descarga	9	134000	\$	1,206,000
Reparaciones de cimentación de motores	9	35000	\$	315,000
Cambio de diafragma	2	7000	\$	14,000
Cambio de valve housing	15	52000	\$	780,000
Cambio de carcasas de diafragma	24	72000	\$	1,728,000
Cambio de air vessel	7	68000	\$	476,000
Cambio de válvulas de servicio severo	12	124000	\$	1,488,000
Servicio de grúa 350 tons	8	60000	\$	480,000
Servicios de mantenimiento GEHO especiales	8	150000	\$	1,200,000
			Total	\$ 14,487,200

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se ve que el incremento del 6.1% en la disponibilidad de las bombas geho genera la necesidad de incrementar el recurso de mano de obra para mantenimiento de predictivo solicitándose 2 ingenieros de confiabilidad esto con la finalidad de no alterar el monitoreo de equipos de las demás áreas, en un inicio se puede incrementar en base a contrato marco y a futuro se puede evaluar la contratación de personal propio.

Así mismo se desarrolla el flujo de caja considerando la inversión inicial, los costos de contratación de personal y los costos evitados de mantenimiento utilizando una tasa de actualización de 10%, como podemos darnos cuenta, que el VAN nos determina una ganancia de \$49,689,355 durante los cinco años del proyecto, con lo que se puede concluir que el proyecto es económicamente viable ya que obtuvimos un valor positivo superando la rentabilidad del 10% esperada

Tabla 40
Valor Actual Neto de Proyecto de Inversión

	FLUJO DE CAJA NETO					
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Proyectos de inversión	-\$4,679,000.00					
Ahorros de mantenimiento		\$14,487,200	\$14,487,200	\$14,487,200	\$14,487,200	\$14,487,200
Personal MPD adicional	-\$114,706	-\$114,706	-\$114,706	-\$114,706	-\$114,706	-\$114,706
	-\$4,793,706	\$14,372,494	\$14,372,494	\$14,372,494	\$14,372,494	\$14,372,494
Tasa 10%						
VAN	\$49,689,355					

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

A partir de los resultados obtenidos se acepta la hipótesis general que establece que “Al implementar el RCM2 en el proceso de mantenimiento, se logrará aumentar la disponibilidad de la estación de bombas GEHO de la empresa minera del departamento de Junín”.

“Además, el desarrollo del análisis de modos y efectos de falla (AMFE) logra cuantificar las posibles razones causales de las fallas funcionales de los equipos. Con estos resultados se logra replantear diferentes actividades proactivas para cada caso de falla encontrada”. Paredes (2018), se concuerda, en que las actividades plateadas tanto de mantenimiento preventivo y predictivo en nuestro modelo reducirán la mayor cantidad de fallas funcionales e incrementará la disponibilidad de los equipos.

Se concuerda con lo mencionado por Moubray (2000) donde nos indica que el desempeño de una planta se mejora haciendo reducir la cantidad y la severidad de las fallas que ocasionan o desencadenan consecuencias operacionales, en dado caso, se han incrementado las horas hombre dedicadas a trabajos de mantenimiento para garantizar la reducción de trabajos correctivos

El resultado del trabajo planificado de mantenimiento, busca evitar la paralización de la cadena productiva en una operación minera y asegurar la mayor disponibilidad de los equipos; y para saber si se está haciendo esta gestión, es necesario medir y obtener valores que nos indiquen si los resultados están dentro lo de los parámetros esperados para la gestión. En este punto validamos nuestra gestión ya que encontramos alto porcentaje de trabajos correctivos vs los trabajos planeados y allí se muestra correlación con la disponibilidad de los equipos. Minero (2020).

No obstante, este estudio presenta algunas limitaciones las cuales van orientadas a la generación y sustentación de CAPEX para la implementación de compra de activos, por otro lado, tenemos la capacitación que el personal requiere para la ejecución de actividades tanto de mantenimiento como para el personal de operaciones, la organización aún no ha implementado ningún proyecto basado en la metodología del RCM esto podría originar una barrera entre los que buscamos llevar a cabo.

Como implicancia, la ejecución de este proyecto con el resultado esperado, puede dar origen a la implementación de la metodología en diversas áreas de la organización donde exista oportunidad de mejora; este estudio, así como otros, son muestra práctica de que el RCM2 es una herramienta eficiente que puede ser implementada en diversos sectores productivos.

4.2 Conclusiones

Primera: La metodología del RCM2 desarrollada planteó actividades de mantenimiento preventivo, predictivo e inspecciones que reduce las fallas funcionales que generan la baja disponibilidad de estación de bombas GEHO. Las actividades se integran a las diferentes estrategias existentes a través del programa de mantenimiento.

Segunda: El diagnóstico de la situación actual de la estación de bombas GEHO, mide los indicadores de disponibilidad de los equipos, con un análisis de los principales eventos que interfieren en las detenciones, siendo caracterizados y propuestos como los modos que causan la falla funcional en los equipos, la disponibilidad obtenida fue de 88.9%, teniendo como precedente que el 63% de trabajos realizados fueron correctivos.

Tercera: Se incrementó la disponibilidad en 95.6%, las actividades preventivas aumentaron en 55%, las correctivas disminuyeron a 26% y las actividades predictivas

aumentaron a 117% con la implementación del RCM2 en la estación de bombas GEHO, lo que se requirió la contratación de 2 ingenieros de confiabilidad para el área de mantenimiento predictivo con la finalidad de no desviar los recursos que actualmente también están orientados en las actividades de mantenimiento predictivo de otras áreas de la planta, la contratación de personal se debe además a asuntos referidos a la seguridad ocupacional, pudiéndose gestionar dentro del contrato de marco actual.

Cuarta: El análisis de la viabilidad económica dio como resultado un ROI de \$3.28: \$1 por la adquisición de proyectos capitalizables, además se obtiene un VAN de \$49,689,355 en el flujo de caja siendo calculado a 5 años.

Quinta: La propuesta de implementación del RCM2 mejorará los indicadores de mantenimiento y por ende tendrá implicancia en la producción a través de una metodología aplicada junto con el mejoramiento continuo, logrará impulsar a la (EM) a la excelencia operacional cumpliendo todos los objetivos de producción, seguridad y cuidado ambiental.

REFERENCIAS

- Castillo, Á. (2017). Propuesta de mantenimiento centrado en confiabilidad de las unidades de bombeo horizontal multietapas del sistema power oil de la estación Atacapi del B57-LIDE Petroamazonas EP. Riobamba (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Díaz, A. & Cruz, J. (2019). Propuesta de guía metodológica para la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en transformadores de potencia (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua.
- Godínez, J. (2015). Diseño de un programa de mantenimiento preventivo basado en RCM para los equipos de bombeo off site (Tesis de pregrado). Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Hernández, R. et al. (2014). Metodología de la Investigación. México: Mc Graw Hill.
- Mesa, D. et al. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. *Scientia et Technica*, ISSN: 0122-1701, 155-160. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6513/3787>.
- Mitchell, J. (2006). Physical Asset Management Handbook. EEUU: Edisi Empat.
- Montes, J. (2018). Diseño de un plan de mantenimiento para la flota articulada de Integra S.A. usando algunas herramientas del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Moubray, J. (2000). Reliability Centred Maintenance (RCM2). North Carolina, EEUU: Edwards Brothers.
- Petrovic, Z. et al. (2014). Implementation of the RCM Methodology on the Example of City Waterworks. *Heavy Machinery-HM* 2014, 3. https://www.researchgate.net/publication/340165695_Implementation_of_the_RCM_Methodology_on_the_Example_of_City_Waterworks
- Reynoso, G. (2015). Aplicación de metodología de RCM para el incremento de disponibilidad de chancadora HP-500 en la Compañía Minera Volcan-Chungar (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro, Huancayo, Perú.
- Robles, J. (2018). Diseño de un plan de mantenimiento basado en RCM para incrementar la vida útil del tren de fuerza de camiones de acarreo marca Caterpillar modelos 793D en

- Sociedad Minera Cerro Verde (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Rumbo Minero (2020). Prevenir para evitar paradas de planta y equipos. Volumen (125), p. 158.
- Salazar, C. (2018). Implementación del RCM para mejorar la disponibilidad de la bomba GEHO TZPM 400 en unidad operativa Selene (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro, Huancayo, Perú.
- Sales, M. (2013). Diagrama de Pareto. Recuperado el 10 de enero del 2020 <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/eco/diagramapareto.html>
- Stefanovic, S et al. (2014). Analysis of technological process of cutting logs using Ishikawa Diagram. *Ata Tehnica Corviniensis*, VII (2067-3809), 98. ISSN: 2067 – 3809. <http://acta.fih.upt.ro/pdf/2014-4/ACTA-2014-4-15.pdf>
- Vilca, P. (2018). Propuesta de implementación de un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM para la mejora de la disponibilidad de los equipos del sistema de carga y transporte en una empresa minera, Lima 2018 (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Lima, Perú.
- Weir Minerals (2011). Installation, Operating and Maintenance Manual. Venlo, Nederland.
- Yengle, E. (2016). Propuesta de un plan de mantenimiento basado en RCM para incrementar la rentabilidad en la operación Cerro Corona de la Empresa San Martín Contratistas Generales S.A. (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú.
- Zavala, C. (2018). Plan de mantenimiento preventivo basado en RCM para el chancador primario Fuller, operación Manto Verde (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

ANEXOS

Anexo 1: Check List Propuesto para el Operador

	Jue.	Vie.	Sáb.	Dom.	Lun.	Mar.	Mié.	Jue.	Vie.	Sáb.	Dom.	Lun.	Mar.	Mié.
Motor Principal														
Check: Ruido extraño, vibraciones, temp														
Check: Fuga de aceite														
Check: Ruido extraño, vibraciones, temp														
Acople flexible														
Check: Ruido extraño, vibraciones, temp														
Reductor														
Check: Fuga de aceite														
Check: Nivel de aceite														
Sistema de refrigeración														
Check: Ruido extraño, vibraciones, temp														
Check: Fuga de aceite														
Acople engranaje														
Ruido extraño, vibraciones, temp														
Fuga de aceite														
Pump Power End:														
Check: Ruido extraño, vibraciones, temperatura														
Check: Flujo, lubricación y presión de aceite														
Check: Contaminación de filtro														
Check: Fuga de aceite														
Check: Nivel de aceite														
Propelling Liquid Unit:														
Check: Venteo de diafragmas														
Check: Verificación de estado de cañerías (llenado & drenado)														
Check: Verificación de agua en líquido propelente														
Check: Presión de aire entre 5 y 7 bar.														
Check: Verificación de operación del M3.														
Check: Contaminación de filtro de aceite														
Check: Verificación de fugas en válvulas 2/2														
Check: Verificación de operatividad de válvulas 3/2														
Check: Inspección del acumulador del líquido propelente														
Check: Inspección de la presión del líquido propelente														
Check: Inspección del flujometro														
Check: Nivel de aceite en tanque líquido Propelente.														
Valve Unit:														
Check: Verificar fugas en sellos de tapas														
Check: Verificar estado de cancamos de izaje en tapa de válvula														
Check: Verificar estado de conectoros hidráulicos en tapa & valve housing														
Air Vessel section:														
Check: Verificar estados de pernos de anclaje														
Check: Inspección de fugas en bridas														
Slurry section:														
Check: Verificar sonidos en válvulas														
Check: Inspección de fugas en cuerpos de diafragmas y válvulas														
Check: Inspección de fugas en bridas, manifolds succión & descarga														
Check: Caudal en correcta relación con la velocidad de la bomba														
Dampener Unit														
Check: A Dampeners pre-charge pressure (3200kPa) or (2400KPa)														
Check: B Dampeners pre-charge pressure (3200kPa) or (2400KPa)														
Check: C Dampeners pre-charge pressure (3200kPa) or (2400KPa)														
Check: Estado de cancamos en tapa de dampeners														
Check: Estado de tuberías de líneas de nitrógeno														
Check: Fuga de nitrógeno en líneas de llenado														
Control Panel:														
Check: Estado de pantalla del panel														
Check: Velocidad de la bomba (%)														
Check: Horas de mantenimiento														
Check: Horas total de funcionamiento														
Check: Presión de descarga (bar)														
Check: Presión de Succión (bar)														
Check: Presión del líquido propelente (bar)														
Check: Tendencia del filling & outlet de valvulas (control panel).														
Check: Lista de alarmas														
Observaciones														

Anexo 2 Esquema de Reubicación de Línea de Bombeo



Anexo 3 Reporte de Ordenes de trabajo Correctivas por Áreas

Planta 选厂

Leyenda 图例	ORDEN DE TRABAJO 工作量				HORAS HOMBRE 工时			
	% TRAB. PROG	PROG COM	TOTAL COM	% YTD	% TRAB. PROG	PROG COM	TOTAL COM	% YTD
	工作完成比例	完成的计划量	完成总量 (包括非计划工作量)	自年初开始, 计划的工作量与全部工作量的比	工作完成比例	完成的计划量	完成总量 (包括非计划工作量)	自年初开始, 计划的工作量与全部工作量的比
< 75% - 100%	100%	5	5	51%	100%	30.2	30.2	52%
< 50% - 75%	100%	40	40	75%	100%	349.8	349.8	69%
[0% - 50%]	100%	14	14	69%	100%	383.2	383.2	67%
	100%	7	7	71%	100%	128	128	79%
	100%	4	4	47%	100%	67.9	67.9	56%
	33%	12	36	30%	40%	95	237	37%
	77.36%	82	106	58.54%	88.13%	1054.1	1196.1	61.74%

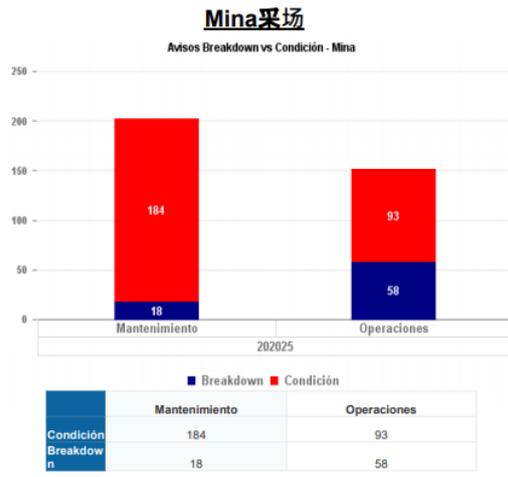
Ots Correctivas No Programadas Ejecutadas:
完成的非计划工单

24

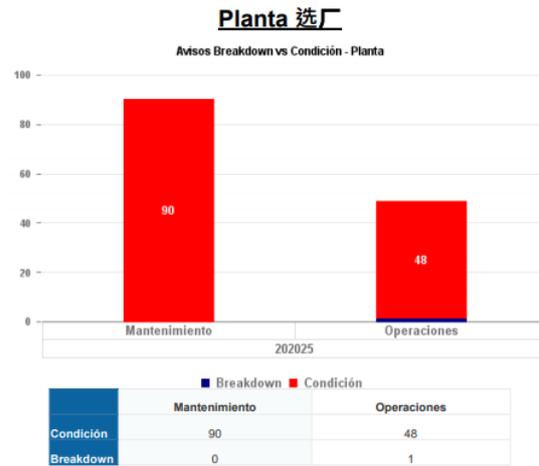
Indica la cantidad de Ots ejecutadas del programa respecto al total de Ots ejecutadas.
列表表示对于总的需执行的工作量, 已经执行的工作量

Anexo 4 Avisos de Mantenimiento Generados en la Operación

Avisos de trabajo generado por mantenimiento / operaciones – Semana 25



En Mantenimiento se han generado 202 avisos.
En Operaciones se han generado 151 avisos. Se debe continuar con la generación de avisos de condición.



En Mantenimiento se han generado 90 avisos.
En Operaciones se han generado 49 avisos. Se debe continuar con la generación de avisos de condición.

Indica la capacidad de identificar el trabajo antes de la falla para reducir las averías no programadas y el aumento de la entrada por operaciones
表示在事故发生前识别故障以减少非计划停车检修

Activar Window
Ve a Configuración

Anexo 5 Asiento Cónico Desgastado Antes del Cambio de Línea de Descarga



Asiento Cónico Desgastado Después del Cambio de Línea de Descarga



Anexo 6 Fisura en Manifold de Bomba GEHO



Anexo 7 Cambio de Manifold de Bomba GEHO TPZM 2000



Anexo 8 Cambio de Cigüeñal de Bomba GEHO TPZM 2000



Anexo 9 Fractura de Cimentación de Power End Bomba GEHO



Anexo 10 Bomba GEHO en Sección

