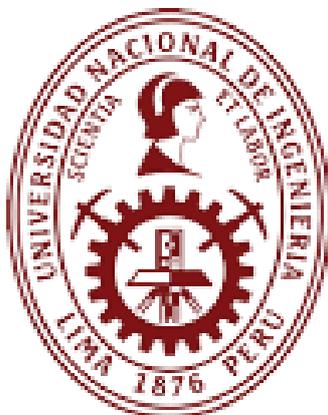


**Universidad Nacional de Ingeniería**

**Facultad de Ingeniería Mecánica**



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Evaluación de la confiabilidad y su impacto en el rendimiento de los equipos del sistema de bombeo de concentrado en una empresa minera de hierro**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico.

Elaborado por

**Miguel Angel Poccomucha Espinoza**

[0009-0007-8471-4164](tel:0009-0007-8471-4164)

Asesor

Ing. Máximo Obregón Ramos

▪ [0000-0003- 1529-3742](tel:0000-0003-1529-3742)

TOMO I DE I

LIMA – PERÚ

2023

## RESUMEN

El presente trabajo de suficiencia tiene como objetivo, optimizar el rendimiento del equipamiento del sistema de bombeo de concentrado de la empresa minera de hierro mediante un estudio de confiabilidad, determinando la jerarquía de los equipos del área, permitiendo así instaurar nuevas secciones en el plan de mantenimiento.

Inicialmente se describe la situación problemática de la gestión del mantenimiento en las empresas del rubro minero, especialmente en el área de producción, ya que se necesita tener un mantenimiento que genere una mejor productividad, por ello se plantea un análisis de confiabilidad para los equipos de la planta de beneficio, de esta manera se garantizará la continuidad de las operaciones con los equipos trabajando en un estado óptimo para desempeñar eficientemente sus funciones.

Para el desarrollo del trabajo se ha recopilado información técnica (datos técnicos de los manuales de los equipos), datos obtenidos de la experiencia en campo como son las órdenes de trabajo, la información histórica de las fallas de los equipos, tiempos de operación y tiempo que se emplea en los mantenimientos programados y no programados.

El trabajo de suficiencia es de tipo aplicada debido a su interés en la utilización y aplicación práctica de conocimientos, a fin de aplicarlas en el proceso del análisis que se realizó.

Por último, se logra el cumplimiento del objetivo planteado que se reflejan en los resultados, discusiones, conclusiones y recomendaciones.

## **ABSTRACT**

The objective of this sufficiency work is to optimize the performance of the equipment of the iron mining company's concentrate pumping system through a reliability study, determining the hierarchy of the equipment in the area, thus allowing the establishment of new sections in the mining plan. maintenance.

Initially, the problematic situation of maintenance management in mining companies is described, especially in the production area, since it is necessary to have a maintenance that generates better productivity, for this reason, a reliability analysis is proposed for the mining equipment. the benefit plant, in this way the continuity of operations will be guaranteed with the teams working in an optimal state to efficiently perform their functions.

For the development of the work, technical information has been compiled (technical data from the equipment manuals), data obtained from field experience such as work orders, historical information on equipment failures, operating times and time used for scheduled and unscheduled maintenance.

The sufficiency work is of an applied type due to its interest in the use and practical application of knowledge, in order to apply it in the process of the analysis that was carried out.

Finally, the fulfillment of the stated objective is achieved, which is reflected in the results, discussions, conclusions and recommendations.

## PRÓLOGO

El presente trabajo de suficiencia “evaluación de la confiabilidad y su impacto en el rendimiento de los equipos del sistema de bombeo de concentrado en una empresa minera de hierro”, se orienta al estudio de confiabilidad para mejorar la productividad de la planta de beneficio, esto mediante mejores procedimientos al momento de realizar los trabajos de mantenimiento.

La evaluación del sistema de bombeo aborda los siguientes capítulos:

En el primer capítulo, introducción, se presenta las generalidades, descripción del problema, objetivo de la tesis, antecedentes referenciales de investigaciones internacionales e investigaciones nacionales.

En el segundo capítulo se presenta el marco teórico, el cual contiene el fundamento teórico fundamental del mantenimiento, tipos de mantenimiento y se explica el método RCM (mantenimiento centrado en la confiabilidad). Así mismo se desarrolla el marco conceptual, para que aquellos términos que tienen más de un significado se puedan comprender según el contexto del trabajo.

En el tercer capítulo, se desarrolla la hipótesis formulada y la operacionalización de variables dependientes e independientes.

En el cuarto capítulo, Metodología de la investigación, se formula el tipo y diseño de la investigación, unidad de análisis y la Matriz de Consistencia.

En el quinto capítulo, se desarrolla el trabajo de Investigación con el procesamiento de toda la información recopilada, se realiza un análisis de criticidad al área propuesta, para luego proceder con un análisis de confiabilidad y obtener los procedimientos más adecuados en las actividades de mantenimiento.

En el sexto capítulo, se realiza el análisis de los datos obtenidos en el capítulo anterior (desarrollo del trabajo de investigación), para contrastar con la hipótesis formulada y realizar una discusión de los resultados obtenidos.

## INDICE

CARATULA	1
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
PRÓLOGO	iv
INDICE	vi
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Generalidades	12
1.2 Descripción del Problema de Investigación	14
1.3 Objetivos del Estudio	19
1.3.1 Objetivo General	19
1.4 Antecedentes Investigativos	20
CAPITULO II. MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL	26
2.1 Marco Teórico	26
2.1.1 Mantenimiento	26
2.1.2 Tipos de mantenimiento predictivo	26
2.1.3 Indicadores para la gestión del mantenimiento	30
2.1.4 Índices e indicadores	31
2.1.5 Proceso de Mantenimiento Centrado a la Confiabilidad	37
2.1.6 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad	38
2.1.7 Análisis de Confiabilidad de un Sistema de Bombeo	47
2.1.7.1 Confiabilidad R(t)	47
2.1.7.2 Métodos para el análisis de riesgo	48

2.1.7.3 Disponibilidad	55
2.2. Marco Conceptual	60
2.2.1 Mantenibilidad	60
2.2.2. Planta	60
2.2.3 Equipo	60
2.2.4 Sistema	61
2.1.5 Concentrado	61
2.2.6 Torta	61
CAPITULO III. HIPOTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	62
3.1 Hipótesis	62
3.2 Operacionalización de variables	62
CAPITULO IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	63
4.1. Tipo y diseño de la investigación	63
4.2 Unidad de análisis	64
4.3 Matriz de consistencia	65
CAPITULO V. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	66
5.1 ELABORACIÓN DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD	66
5.1.1. Jerarquización De Equipos Críticos	66
5.1.2. Criterios de criticidad	70
5.2. ANALISIS DE DISPONIBILIDAD	79
5.3. ELABORACION DEL AMEF	80
5.3.1. Bomba Centrifuga de concentrado	80
5.3.2. Determinación del análisis modal de efectos y fallos	83
5.3.3. Elaboración de AMEF y evaluación del NPR	87
5.3.4. Diagrama de decisiones	91

5.3.5 Planilla de información RCM	92
5.3.6 Hoja de decisión	99
CAPÍTULO VI – ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	111
CONCLUSIONES	119
RECOMENDACIONES	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
ANEXOS	130

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. PBI anual por sectores productivos Perú	12
Figura 2. Áreas de gestión de mantenimiento.	16
Figura 3. Circulo vicioso del mantenimiento reactivo	17
Figura 4. Iceberg de costos de Mantenimiento	18
Figura 5. Mantenimiento centrado en Confiabilidad (MCC)	28
Figura 6. Proceso de mantenimiento centrado en la confiabilidad	36
Figura 7. Esquema de equipo natural de trabajo	43
Figura 8. Pasos del Análisis modal de fallos (AMFE)	51
Figura 9. Tiempo de operación y fuera de servicio	55
Figura 10. Análisis RAM	59
Figura 11. Índice de criticidad	69
Figura 12. Disponibilidad bombas concentrado año 2021	79
Figura 13. Árbol lógico de decisiones de actividades de mantenimiento	91
Figura 14. Disponibilidad bombas concentrado año 2022	109
Figura 15. Disponibilidad bombas concentrado L1	110
Figura 16. Disponibilidad bombas concentrado L2	110

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre el mantenimiento tradicional y MCC	29
Tabla 2. Matriz de consistencia	65
Tabla 3. Equipos de la Planta Filtros	65
Tabla 4. Análisis de criticidad de la Planta Filtros	68
Tabla 5. Matriz de criticidad	74
Tabla 6. Jerarquización de sistemas	74
Tabla 7. Disponibilidad bombas Underflow Julio 2021	76
Tabla 8. Disponibilidad bombas Overflow Julio 2021	76
Tabla 9. Disponibilidad bombas Underflow Agosto 2021	77
Tabla 10. Disponibilidad bombas Overflow Agosto 2021	77
Tabla 11. Disponibilidad bombas Underflow Setiembre 2021	78
Tabla 12. Disponibilidad bombas Overflow Setiembre 2021	78
Tabla 13. Disponibilidad en bombas de concentrado Año 2021	79
Tabla 14. División del Sistema de Bomba Centrífuga	80
Tabla 15. Índice de detección de fallos	86
Tabla 16. Puntajes NPR numero de prioridades de riesgo modal de fallos y efectos (AMFE)	86
Tabla 17. Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) en número de prioridades de riesgo NPR.	88
Tabla 18. Índice modal efectos y fallos sistema de bombeado de concentrados de hierro	89
Tabla 19. Índice modal efectos y fallos sistema de bombeado de concentrados de hierro	90
Tabla 20. Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) por componentes	93
Tabla 21. Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) por modo de falla	94
Tabla 22. Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente impulsor	95
Tabla 23. Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente voluta	96

Tabla 24. Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente Plato lado succión	97
Tabla 25. Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente Plato lado descarga	97
Tabla 26. Análisis RCM (reliability-centered Maintenance) o mantenimiento centrado en la confiabilidad, tarea propuesta de implementación.	101
Tabla 27. Análisis RCM (reliability-centered Maintenance) o mantenimiento centrado en la confiabilidad, tarea propuesta de implementación.	102
Tabla 28. Análisis RCM (reliability-centered Maintenance) o mantenimiento centrado en la confiabilidad, tarea propuesta de implementación.	103
Tabla 29. 2do. Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) en número de prioridades de riesgo NPR	104
Tabla 30. 2do. índice modal efectos y fallos sistema de bombeado de concentrados de hierro	105
Tabla 31. Disponibilidad bombas Underflow Julio 2022	106
Tabla 32. Disponibilidad bombas Overflow Julio 2022	106
Tabla 33. Disponibilidad bombas Underflow Agosto 2022	107
Tabla 34. Disponibilidad bombas Overflow Agosto 2022	107
Tabla 35. Disponibilidad bombas Underflow Setiembre 2022	108
Tabla 36. Disponibilidad bombas Overflow Setiembre 2021	108
Tabla 37. Disponibilidad en bombas de concentrado Año 2022	109
Tabla 38. Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Julio 2021	130
Tabla 39. Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Agosto 2021	131
Tabla 40. Historial de fallas en Bombas de Concentrado Setiembre 2021	132
Tabla 41. Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Julio 2022	133
Tabla 42. Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Agosto 2022	133
Tabla 43. Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Setiembre 2022	134

## CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

La minería en este siglo XXI, consiste en uno de los mayores ingresos para el país, ya que representa un gran porcentaje de exportaciones nacionales, genera divisas, empleos y representa un buen porcentaje del PBI tal como se muestra en la figura 1.1, donde se observa que, a pesar de la coyuntura mundial actual de pandemia, se proyecta un crecimiento del 14% en el PBI del año 2021.

**Figura 1**

*PBI anual por sectores productivos, en los años 2020 - 2021 Perú*

	Peso del año base 2007	2020	2021	Promedio 2022-2024
<b>Agropecuario</b>	<b>6,0</b>	<b>2,2</b>	<b>4,5</b>	<b>4,0</b>
Agrícola	3,8	3,0	4,9	4,1
Pecuaria	2,2	1,2	4,0	4,0
<b>Pesca</b>	<b>0,7</b>	<b>4,6</b>	<b>10,4</b>	<b>2,4</b>
<b>Minería e hidrocarburos</b>	<b>14,4</b>	<b>-10,8</b>	<b>14,4</b>	<b>3,3</b>
Minería metálica	12,1	-10,9	15,1	3,8
Hidrocarburos	2,2	-10,2	10,0	0,0
<b>Manufactura</b>	<b>16,5</b>	<b>-13,3</b>	<b>13,3</b>	<b>5,4</b>
Primaria	4,1	0,4	13,4	4,7
No primaria	12,4	-18,2	13,2	5,7
<b>Electricidad y agua</b>	<b>1,7</b>	<b>-7,2</b>	<b>6,2</b>	<b>4,5</b>
<b>Construcción</b>	<b>5,1</b>	<b>-23,2</b>	<b>22,0</b>	<b>6,4</b>
<b>Comercio</b>	<b>10,2</b>	<b>-20,7</b>	<b>12,0</b>	<b>4,4</b>
<b>Servicios</b>	<b>37,1</b>	<b>-9,9</b>	<b>7,2</b>	<b>4,5</b>
<b>PBI</b>	<b>100,0</b>	<b>-12,0</b>	<b>10,0</b>	<b>4,5</b>
<b>PBI primario</b>	<b>25,2</b>	<b>-5,6</b>	<b>11,4</b>	<b>3,7</b>
<b>PBI no primario<sup>3</sup></b>	<b>66,5</b>	<b>-13,7</b>	<b>9,7</b>	<b>4,8</b>

*Nota.* Variación del porcentaje real anual del PBI por sectores de producción teniendo como base los valores del 2007, la realidad de los años 2020 y 2021, y la proyección para el periodo 2022 – 2024.

*Fuente:* Reporte de producción INEI (2020)

Dentro del sector minero, la operatividad de los equipos es un factor muy importante, ya que se requiere que siempre estén produciendo para cumplir las metas de negocio. Por ello, es importante que estos equipos funcionen adecuadamente y en las mejores condiciones, logrando así minimizar las horas inoperativas y pérdidas de producción.

Todas las fallas que suceden en una planta de proceso, una por una, representan potencialidades de riesgo, por esta razón es muy importante comprender los patrones subyacentes a través de los cuales los equipos fallan, así se implementaran mejores acciones correctivas o preventivas (Aguilar, 2010).

El análisis de confiabilidad incorpora métodos para la identificación y evaluación de riesgos, el análisis de modos de falla y efectos (AMFE), en composición con una calificación del grado de criticidad del riesgo de un equipo. Esta herramienta permite materializar un entendimiento integral del sistema que falla y facilita identificar la forma en la que se presentan las fallas o defectos de los equipos en los componentes del sistema. (Aguilar, 2010)

Las acciones de recomendación derivadas al aplicar el análisis de confiabilidad se establecen como operaciones o tareas relacionadas con el mantenimiento para mejorar la gestión del mantenimiento, brindando de esta manera el soporte adecuado y las respuestas oportunas y certeras ante cualquier eventualidad que se pueda suscitar durante la operación de los equipos, lo que garantiza una reducción de tiempo perdido en las actividades de mantenimiento y un incremento en la producción.

## 1.2 Descripción del Problema de Investigación

Para Mora (2011), las investigaciones relacionadas con los sistemas para gestionar el mantenimiento se basan en teorías de disciplinas como las matemáticas, la estadística y la probabilística. Todas estas ciencias ayudan a la evaluación eficaz de las fallas y a la identificación de las causales más relevantes de un equipo. De esta forma se contribuye a la operación continua de los equipos, consiguiendo aumentar la disponibilidad y confiabilidad, así se reduce el tiempo necesario para intervenir un equipo en funcionamiento, impactando directamente los costos del mantenimiento.

La Cámara minera del Perú, (2019), sostiene que en el siglo XXI las empresas mineras aspiran a tener mantenimiento que genere una mejor productividad, y la confiabilidad es una pieza fundamental en este proceso. Así mismo tienen como objetivo principal la optimización de sus equipos para garantizar la continuidad de las operaciones.

Los recursos de que se dispone para el mantenimiento del equipamiento y la gestión de los activos de una organización en la mayoría de las ocasiones no son suficientes. Por lo tanto, se debe establecer prioridades concentrando esfuerzos para aumentar la confiabilidad de los equipos.

En ese sentido, al tener limitaciones en los recursos, se trata de intervenir los equipos cuando se presentan fallas (mantenimiento correctivo), esto conlleva a que no se prevengan con antelación las fallas que se suscitan en los componentes de los equipos.

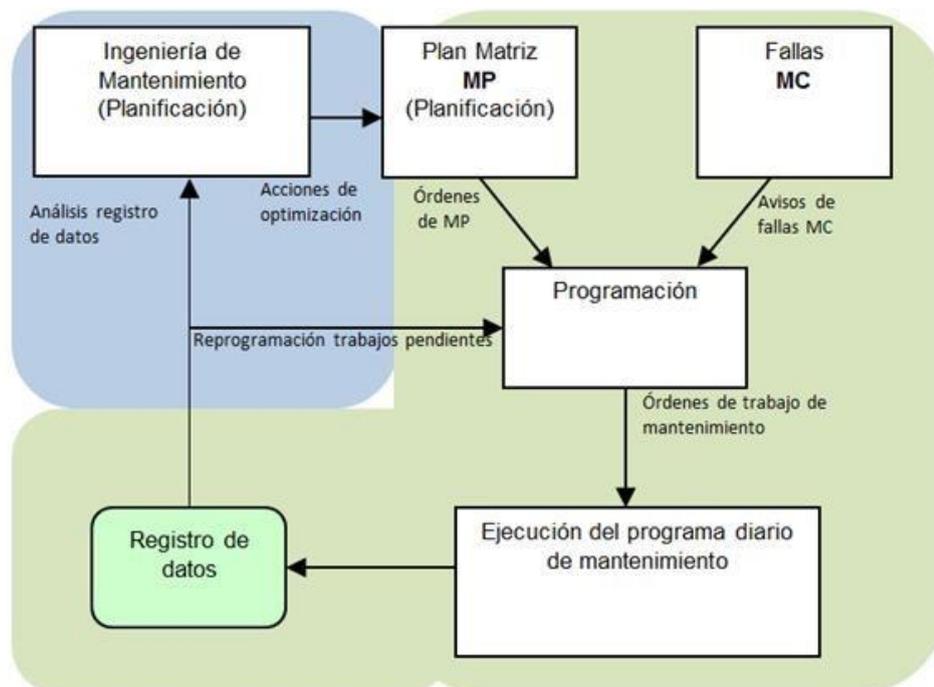
Esta carencia no permite identificar los repuestos críticos, así mismo la elaboración de adecuados planes de mantenimiento que garanticen la prevención de las posibles fallas de los equipos, puesto que únicamente se siguen las recomendaciones del fabricante, principalmente la sustitución de partes y piezas que cumplen su tiempo de vida útil.

Asimismo, no contar con un análisis de confiabilidad adecuado ocasiona un direccionamiento deficiente de la gestión de mantenimiento, y limita una toma de decisión eficaz, que perjudica guiar los trabajos y recursos asociados en aquellas áreas donde la operación lo necesite más.

Una baja productividad y elevados costos de mantenimiento muchas veces se deben a una mala gestión en las áreas de mantenimiento (área de planificación y área de ejecución), lo que resulta en un bajo rendimiento del equipamiento, la falta de repuestos y un bajo porcentaje de trabajos programados. En la figura 1.2 se puede apreciar cómo se relacionan ambas áreas y la forma adecuada de trabajo.

**Figura 2**

Áreas de gestión de mantenimiento.



Nota. Flujograma de operaciones de las Áreas de gestión de mantenimiento.

**Fuente:** *Optimización de la Gestión del Mantenimiento en una Situación de Alta Demanda*, Gramsch, J. (2020).

Según Klimasauskas, (2013) la seguridad de los recursos humanos que participan en el proceso productivo es posible que se afecte por fallas no esperadas producidas por un mantenimiento de baja calidad. En el caso del medio ambiente no se encuentra fuera de esta situación, por ejemplo, derrames, incendios, emisiones de gas, entre otras. En la mayoría de las ocasiones son causadas por prácticas inadecuadas de mantenimiento.

Para Úscategui (2014) se genera un gran impacto cuando se lleva a cabo un nivel menor de mantenimiento planificado, lo cual influye en la aparición de más fallas durante el proceso productivo. Cuando ocurre esto se genera el llamado “circulo vicioso del mantenimiento reactivo” (figura 1.3), que afecta en todos los elementos importantes para el éxito.

**Figura 3**

*Círculo vicioso del mantenimiento reactivo.*



*Nota.* Elementos que componen el círculo vicioso del mantenimiento reactivo.

**Fuente:** Orrego, Juan (2007) *Introducción a la gestión del mantenimiento*

La teoría tradicional, expresaba que el mantenimiento como un mal necesario, situación que no contempla el desgaste de los equipos en un periodo de tiempo, la preocupación de la gerencia se enfocaba en la disminución de los costos de mantenimiento, impactando directamente la eficiencia de la empresa. También es un hecho que un mantenimiento de baja calidad afecta integralmente la operación de la industria limitando niveles de producción, afectándose la calidad de las producciones y generando daños al ambiente.

Según Klimasauskas (2013), se generan costos indirectos que son mayores que el costo histórico de mantenimiento (tercerización). Los costos indirectos en el mantenimiento son mayores en gran escala que los directos. Gráficamente, se los representa en el llamado Iceberg de costos de mantenimiento, tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4

*Iceberg de costos de Mantenimiento*



*Nota.* Elementos que forman parte del Iceberg de costos de mantenimiento.

**Fuente:** *Mantenimiento Preventivo: Mitos y Ventajas ABB, (2020).*

Para ABB, (2020) de acuerdo con los costos visibles o directos del mantenimiento preventivo son solo la “punta del iceberg” comparado con los costos del no-mantenimiento. Hay numerosos costos escondidos que pueden ser evitados siguiendo sistemáticamente los planes de mantenimiento.

Es entonces que establecemos el siguiente planteamiento de la problemática:

¿Cómo influye la evaluación de la confiabilidad y su impacto en el rendimiento de los equipos del sistema de bombeo de concentrado en una empresa minera de hierro?

### **1.3 Objetivos del Estudio**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar la confiabilidad y su impacto en el rendimiento de los equipos del sistema de bombeo de concentrado en una empresa minera de hierro.

## 1.4 Antecedentes Investigativos

### Antecedentes nacionales

Ramírez y Moreno (2017) en su tesis “Elaboración de un análisis de criticidad y disponibilidad para la atracción x-treme del parque mundo aventura, tomando como referencia las normas, SAE JA1011 y SAE JA1012” El siguiente documento tiene como objetivo principal realizar un estudio basado en clasificar adecuadamente los componentes mecánicos de sistemas o equipos eléctricos de más prioridad analizada, que componen el equipo, para generar de manera necesaria los programas mantenimiento en el futuro que eleven los niveles de disponibilidad del equipamiento y disminuya el tiempo entre fallas, y los tiempos para ejecutar el mantenimiento programado y correctivo.

Verdezoto (2015) en su tesis “Propuesta de elaboración de un plan de mantenimiento predictivo, basado en la criticidad de los equipos del proceso de laminación en caliente para la empresa ANDEC S.A.” En esta investigación se propone la puesta en marcha de un programa de mantenimiento predictivo en procesos de laminación, con el objetivo de mejorar la confiabilidad y disponibilidad) del equipamiento. La investigación se basó en la conceptualización básica de la gestión del mantenimiento y en especial del que se enfoca en condiciones. En el estudio se exponen varias técnicas predictivas para detectar oportunamente las fallas, estas ayudarán en el desarrollo de un programa de mantenimiento predictivo que tiene en cuenta

los parámetros medibles de la tecnología. Los resultados de los análisis de fallas expresaron que el 73 % de las fallas mecánicas pudieron evitarse al aplicar un programa de mantenimiento adecuado, además de elevar la disponibilidad de los equipos y se de esta forma aumentar los niveles de producción.

ORTÍZ R. (2014) en su tesis “Diseño e implementación del sistema de bombeo principal del sector a - mina calenturitas, propiedad de C.I PRODECO S.A, La Loma” se planteó como objetivo la optimización de las líneas de bombeo contribuyendo al manejo y control de las aguas en la mina. En el trabajo se realizaron las acciones de control de la existencia de agua dentro del pit, que es uno de los mayores problemas en las minas a cielo abierto. Este problema ha originado la suspensión temporal de operaciones y actividades de los equipos de cargue y acarreo, afectando significativamente la producción, ante esta problemática se hace imprescindible aplicar un sistema de bombeo con un sistema de monitoreo y control. Como resultado final en la investigación se demostró la existencia de horas perdidas de operación hasta de 12hr/turno, lo que provocó en el año 2013 que se perdieran 558 horas producto del mal manejo y control de las aguas.

Curiel y Padilla (2010) en su tesis: “Análisis de Confiabilidad en los Equipos De Bombeo de Agua Cruda en la Empresa Acuacar S.A” después de realizado el análisis confiabilidad se llegó a la conclusión de que el mantenimiento de sustitución cíclica del sistema de bombas, produce mayores costos por el

tiempo y por los recursos empleados en el mantenimiento. Otra de las conclusiones es que en ocasiones es innecesaria la sustitución cíclica, teniendo en cuenta las recomendaciones técnicas de los fabricantes (fluctúa entre 24.000 y 25.000 horas de operación óptimas). En este caso al cumplirse el tiempo recomendado el equipo aun cuenta con desgaste, que puede impulsar el caudal y la presión reglamentada para el cual fue instalado. Teniendo en cuenta lo anterior, se debe hacer el monitoreo y control de las medidas identificadas como vibraciones y alineamiento. Según el trabajo de investigación esto se hace con el objetivo de reemplazar los elementos de las bombas en un estado específico y es resultante de las observaciones de confiabilidad que se realizaron. En general se obtiene un mayor aprovechamiento de los costos de reacondicionamiento cíclico y la adquisición de repuestos, conservando la calidad de la prestación del servicio.

### **Antecedentes internacionales**

Contreras (2016) en su tesis “Plan de mantenimiento de equipos de movimiento de tierra por criticidad para tener maquinas disponibles en la municipalidad provincial de Yauli - La Oroya”, se trazó el objetivo de la utilización de la ciencia del mantenimiento por criticidad de fallos en equipamiento de movimiento de tierra para elevar la disponibilidad de sus equipos. En la investigación se propone la aplicación del mantenimiento enfocado en la confiabilidad de los cargadores frontales, que son equipos de gran desempeño, si se tiene en cuenta que su funcionamiento es continuo. Se realizó un plan de mantenimiento basado en RCM (mantenimiento centrado

en la confiabilidad), en el análisis se identificó así las funciones del equipo operativo, fallas funcionales, modos de falla, realizando el análisis modal de fallos y efectos (AMFE), que fue la base del estudio de investigación. El resultado del análisis demostró cuales podrían ser las fallas necesarias a corregir y las tareas de mantenimiento.

Montano (2013) en su tesis “Gestión de mantenimiento basado en la confiabilidad aplicado para una flota de volquetes de 50 toneladas para acarreo de mineral en la mina Arasi”, realizó una investigación que tuvo como objetivo el análisis los elementos críticos que influyen en la realización de una gestión adecuada del mantenimiento enfocada en la confiabilidad. La investigación concluye la ejecución del mantenimiento enfocado en la confiabilidad logra mejorar en gran medida el desempeño de las unidades de mantenimiento de los equipos. Se logra aumentar de esta manera la disponibilidad entre 88% y 93%, logrando mejorar 60 horas mensuales por unidad, generando beneficios económicos a empresa.

Javier J. (2013) en su tesis “optimización del sistema de bombeo de la rampa de profundización 7400(-) de compañía minera san Ignacio de Morococha - unidad de producción San Vicente” concluye en su estudio que el circuito implementado de bombeo simplifica en gran medida el sistema de bombeo, debido a que realiza un adecuado control y manejo del mantenimiento en el sistema de bombeo de las operaciones. Una de las conclusiones de la investigación es que la selección de la tubería a utilizar fue

el óptimo producto de que no existirán dificultades con los golpes de arietes. En otra conclusión trabajar con estas tuberías por la familiaridad en la instalación y uniones con tecnología de termo fusión. El equipo de bombeo evaluado es la bomba FLYGT 2201(43kW), no debe tener dificultades para trabajar de acuerdo con los análisis realizados. Los resultados de la investigación apuntan a los equipos de baja potencias deben ser sustituidos por las bombas FLYGT -2201, para un bombeo a mayor cabeza operativa. Esta acción disminuye los costos del sistema de bombeo en materiales, repuestos y recursos humanos.

Orcón G. (2015) en su tesis “Propuesta De Un Plan De Mantenimiento Predictivo Basado En El Análisis Vibracional Caso: Sistema De Bombeo, Unidad De Espesadores Del Proyecto Toromocho” concluye que el mantenimiento del sistema de bombeo propuesto obtuvo el resultado de 44,5 % más seguro y eficaz que el mantenimiento que se da en la actualidad que responde a la problemática, logrando la disminución del tiempo parados en los equipos. Se diseñaron los puntos críticos para medir de errores y fallos en el equipamiento de bombeo teniendo en cuenta los elementos y componentes que los conforman según su configuración interna, tratando siempre de acercarse a los apoyos, logrando en las observaciones mejores valores en vibración. Se fijaron niveles de alarma según la norma ISO 10816, utilizando un análisis de confiabilidad se pudo identificar el estado de vibración de los equipos al comenzar el programa del mantenimiento, lográndose tolerancias según el estándar. En el análisis de los espectros durante el monitoreo se

identificaron deficiencias de desbalance, desalineación y de soldadura mecánica en los equipos de bombeo.

De la Rosa y Torres (2019) en su tesis “Análisis de Fallas Y Confiabilidad de Sellos Mecánicos en Bombas de Lodos” concluye que, después del análisis de confiabilidad se ha logrado conocer, que las principales fallas que ocurren en los sellos mecánicos son la inadecuada instalación de la bomba, como también el diseño deficiente y la contaminación del líquido en los prensaestopas. Las fallas en los sellos mecánicos tienen como consecuencias la baja productividad de planta de los equipos de bomba, retrasos en operación y tiempos muertos. Esto queda reflejado en gastos económicos altos no esperados o planificados para la empresa. Las fallas en los sellos mecánicos de la bomba deben ser tenidas en cuenta, ya que provocan grandes pérdidas y se afectan las partidas de costos operativos de la empresa, pero si son analizadas frecuentemente a través de controles de tareas consideradas, todo el sistema de bombeo será optimizado.

## **CAPITULO II. MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **2.1 Marco Teórico**

#### **2.1.1 Mantenimiento**

Para Moubray, J. (2004) se considera mantenimiento al grupo de actividades que se realizan para asegurar que un activo continúe desempeñando las funciones para las cuales fue diseñado.

El fundamento principal del mantenimiento es elevar la disponibilidad de una maquina o equipo, al mismo tiempo que eleva factores como la confiabilidad y reduce la mantenibilidad. Esto permite disminuir las horas pérdidas debido a planes que obstaculizan el cumplimiento de los tiempos de producción y aumentan los costos de mantenimiento.

#### **2.1.2 Tipos de mantenimiento predictivo**

Es un mantenimiento planificado, con enfoque preventivo, que se basa en el análisis técnico, en los programas de inspección y reparación de equipamiento. Este tipo de mantenimiento es capaz de adelantarse a las fallas, en otras palabras, detecta fallas potenciales con el equipo funcionando. La condición operacional del equipo se logra a través de un monitoreo sistemático de los parámetros claves de operación.

### **2.1.2.1 Mantenimiento preventivo**

Consiste en un conjunto de tareas planificadas que se llevan a cabo periódicamente, para garantizar que el equipamiento cumpla con sus funciones en cada etapa de su ciclo de vida útil dentro de su ambiente operacional. Además, se ocupa de alargar sus ciclos de vida para mejorar la eficiencia de los procesos.

### **2.1.2.2 Mantenimiento correctivo**

Consiste en la realización de un grupo de tareas de reparación que no están planificadas, y se ejecutan con el fin de restablecer las funciones de un equipo cuando este no se encuentra en condiciones normales de funcionamiento. Para llevarlo a cabo es imprescindible establecer paradas no previstas, estas fallas se originan en desperfectos no identificados durante las inspecciones predictivas, errores en la operación, nula existencia de tareas de mantenimiento y políticas erróneas de operación.

### **2.1.2.3 Mantenimiento de Clase Mundial**

Representa un grupo de buenas prácticas operacionales y de mantenimiento que si se aplican son capaces de generar ahorros importantes a las organizaciones. Esta filosofía agrupa diferentes enfoques de organización con visión de negocio.

#### **2.1.2.4 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC)**

Es un proceso que ayuda a identificar las acciones a realizar para asegurar que un elemento físico continúe en operación según las funciones diseñadas en su contexto operacional. Este proceso se orienta a comprender las funciones del sistema para que éste las mantenga durante todo el proceso. Para aplicarlo correctamente se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: definición del contexto operacional, estándares de desempeño, modos de fallas, efectos de la falla y consecuencia de fallas.

Moubray, J. (2004) plantea que el mantenimiento enfocado en la confiabilidad es una forma metodológica que se usa para determinar las tareas a realizar para que los activos funcionen según lo requerido por los usuarios en el contexto operacional presente, Figura 2.1. Este tipo de mantenimiento trata de analizar las funciones de los activos para observar cuáles pueden ser sus posibles fallas y errores. Trata de detectar los modos de fallas o causas de fallas, estudiando sistemáticamente sus efectos y analizando sus consecuencias. Es así que, a partir de la evaluación de los riesgos y sus consecuencias, se determinan las estrategias, las tareas de operación, tanto técnica como económicamente factibles. La comparación con el mantenimiento tradicional se observa en la tabla.

**Tabla 1**

Comparación entre el mantenimiento tradicional y el MCC

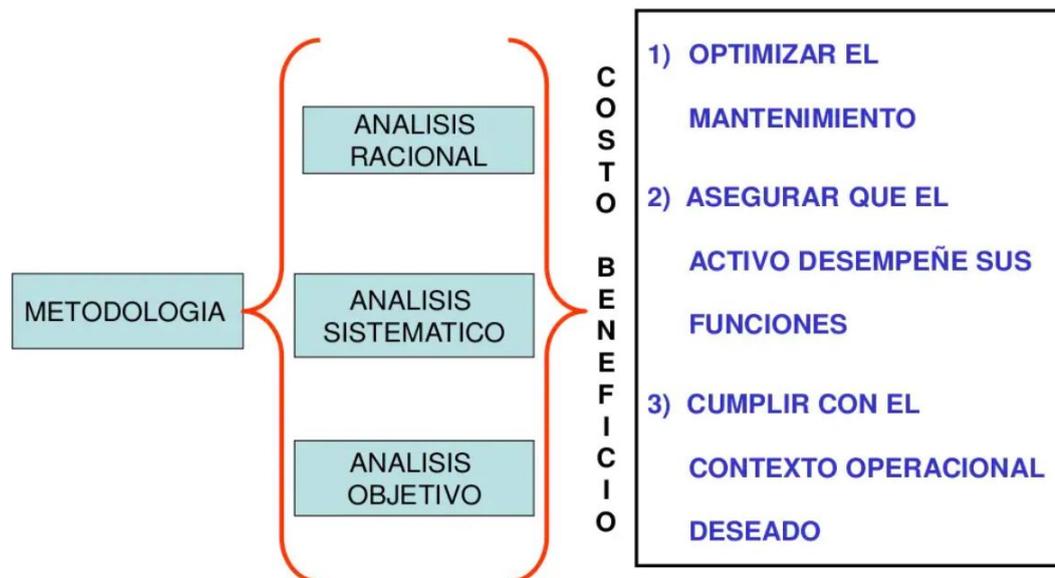
Mantenimiento Tradicional	Mantenimiento centrado en Confiabilidad (MCC)
Mantenimiento para conservar los equipos en buen estado.	Mantenimiento para conservar las funciones de los activos físicos.
Mantenimiento rutinario para prevenir la falla.	Mantenimiento rutinario para evitar, reducir o eliminar las consecuencias.
El objetivo del mantenimiento era optimizar la disponibilidad de la planta a un costo bajo.	Su objetivo no solo es optimizar la disponibilidad de la planta, sino también aumentar la seguridad, la integridad ambiental, la calidad de los productos y el servicio al cliente.
La mayoría de los equipos tiende a fallar a medida que envejecen.	Se presenta modelo de fallas de los equipos determinados por curvas de probabilidad de falla contra la vida útil.

Nota. Comparación del mantenimiento tradicional versus el mantenimiento centrado en Confiabilidad (MCC).

**Fuente:** RCM Mantenimiento centrado en la confiabilidad. Moubray, J. (2004).

**Figura 5**

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).



Nota. Costo beneficio del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC).

**Fuente:** Mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM. Moubray, J. (2004).

Las ventajas del Mantenimiento centrado en Confiabilidad (MCC) se muestran a continuación:

1. Estrategia para optimizar operaciones de mantenimiento.
2. Asegurar mayor disponibilidad de activos.
3. Beneficio económico de la aplicación.
4. Mayor y mejor información disponible.
5. Mejorar los requerimientos del proceso.
6. Reducir costos de inversión, operación y/o mantenimiento.
7. Mayor confiabilidad del proceso.
8. Nueva cultura de producción basada en un análisis lógico, estructurado y objetivo.

### **2.1.3 Indicadores para la gestión del mantenimiento**

Para Leal & Zambrano (2006), la gestión del mantenimiento incluye la organización, planificación, programación, ejecución, control y retroalimentación del mantenimiento para su mejoramiento continuo, es un proceso necesario en la producción rentable. Tanto como el proceso de control como el de monitoreo se debe ejecutar a través de indicadores dentro del plan de mantenimiento de los equipos, estos deben ocuparse de la comprobación de la gestión actual, y debe además implementar de la mejor forma, realizando mediciones y correcciones para evitar los errores y desviaciones. Todo esto con el objetivo de que los procesos se implementen de forma correcta. Los equipos de trabajo que se ocupan del mantenimiento deben aprender y formarse teniendo en cuenta la experiencia del monitoreo y control.

A través del tiempo, las empresas enfocan sus esfuerzos en bajar los costos para el logro de la producción presupuestada y es en este sentido donde la función del mantenedor juega un papel relevante en el cumplimiento de esta meta, esto debido a que gracias a una buena gestión se logra mayor disponibilidad de los sistemas productivos para que la producción sea alta, con un mínimo de reproceso y paradas no programadas que afectan la capacidad de respuesta para el cliente.

#### **2.1.4 Índices e indicadores**

Según Tavares y otros (2007), identificar adecuadamente los indicadores de mantenimiento del sistema supone para las empresas utilizar un gran número de variables que propicie su gestión y la obtención de datos confiables. No obstante, existen indicadores concretos e idóneos puestas en una observación sistemática y confiable para el mantenimiento de un equipo activo a través de instrumentos para el análisis de confiabilidad. Disponer de indicadores, de mayor uso a nivel mundial conocidos en la literatura, propuestos por asociaciones de diversos sectores industriales con gran experiencia en este tema, facilitan mucho la tarea al equipo técnico profesional humano empresarial de gestión y de toma de decisiones. A pesar de que se disponga de estas herramientas, una unidad de trabajo tiene el deber de realizar un análisis en función de la estrategia, los objetivos y particularidades propias.

Dentro de los indicadores conocidos en la literatura de mantenimiento de mayor uso, destacan los conocidos como indicadores de clase mundial. Esta categoría corresponde a los indicadores más utilizados a nivel internacional en las áreas de mantenimiento de la industria actual. Entre los seis primeros indicadores, cuatro de ellos corresponden al análisis de la gestión de equipamiento, estableciendo tiempos o porcentajes de estos, y dos están vinculados a la gestión de los costos. A continuación, se muestran los indicadores empleados en el estudio.

**Clase Mundial:**

- a. Indicador Tiempo Medio Entre Fallas (TMEF): Tiene que ver con el período de ocurrencia de averías en un activo, logrando de esta manera minimizar los tiempos de parada.
- b. Indicador Tiempo Medio Para Reparación (TMPR): Corresponde al tiempo invertido en reparar una falla, este indicador contribuye a disminuir los tiempos de parada, ya que al tener claro el tiempo que demora en ejecutar el mantenimiento se puede hacer un mejor análisis de los recursos necesarios y el personal demandado para ello.
- c. Tiempo medio para el fallo (TMPF):
- d. Indicador Disponibilidad De Equipos (DISP): Corresponde a la cantidad de tiempo expresado en porcentaje en que un activo queda disponible para el organismo de operación autorizado para realizar su actividad. Este indicador complementa los indicadores antes mencionados.

- e. Indicador Costo de Mantenimiento por Facturación (CMPT): Es el porcentaje correspondiente al costo de mantenimiento en relación al total de facturación de la empresa.
- f. Indicador Costo de Mantenimiento por Valor de Reposición (CMRP): Tiene que ver con el valor que se gasta en el activo por concepto de mantenimiento.

### **Gestión de Equipos**

- a. Indicador No-Conformidad de Mantenimientos: Este indicador facilita conocer el cumplimiento del mantenimiento establecido, en otras palabras, saber el porcentaje de mantenimientos que se incluye en el plan.
- b. Indicador Sobrecarga de Servicios de Mantenimientos: Este ayuda a saber cuándo se están realizando más mantenimientos de los que contiene el plan y además permite apreciar cuanto rinde la mano de obra.
- c. Indicador Alivio de Servicios de Mantenimientos: Se usa para saber cuándo se ejecuta un menor número de mantenimientos de los planificados.
- d. Indicador Trabajo En Mantenimiento Programado: Representa el porcentaje en horas invertido en ejecutar el mantenimiento programado con respecto al total de horas disponibles. Es la sumatoria de todas las horas disponibles de todo el recurso humano.

### **Mano de Obra**

- g. Indicador Trabajo en Mantenimiento por Avería: Es útil para visualizar el porcentaje de horas invertidas para ejecutar el mantenimiento por falla en

relación al total de horas disponibles.

- h. Indicador Otras Actividades del Personal de Mantenimiento: Tiene que ver con el porcentaje de horas en que se ejecutan otras tareas de mantenimiento en relación al total disponible, además es útil dar seguimiento a las actividades productivas e improductivas.
- i. Indicador Capacitación del Personal de Mantenimiento: Representa el porcentaje en horas utilizadas en la formación al personal de mantenimiento relación a las horas disponibles.
- j. Indicador Horas No Calculadas del Personal de Mantenimiento: Es el porcentaje de tiempo en el cual el personal no realizó ninguna actividad, además ayuda a ver las horas de ocio del personal.
- k. Indicador Personal de Control: Ayuda a ver el porcentaje de horas utilizadas en controlar las actividades de mantenimiento respecto a las horas disponibles.
- l. Indicador Personal de Supervisión: Aporta las horas utilizadas en ejecutar la supervisión del mantenimiento en relación a las horas disponibles.
- m. Indicador Efectivo Real O Efectivo Promedio Diario: Es el porcentaje de horas que no se trabajó producto a elementos externos como es el caso de vacaciones, accidentes, enfermedades y apoyo a otras áreas en relación al total de horas disponibles en la organización, además es útil para mostrar lo necesario del estudio para fijar un plan de vacaciones o la incidencia de otros eventos.
- n. Indicador Tasa de Frecuencia de Accidentes: Es el número de accidentes ocurridos por millón de horas operadas.

- o. Indicador Tasa de Gravedad de Accidentes: Es la cantidad de horas por hombre perdidas por accidentes en relación al millón de horas trabajadas.
- p. Indicador Componente del Costo de Mantenimiento: Es el impacto del costo de mantenimiento (materiales y repuestos más la mano de obra) en relación al costo de producción de la empresa.

### **Costos**

- a. Indicador Progreso En Los Esfuerzos De Reducción De Costos: Representa la influencia de la mejoría o deterioro de las tareas de mantenimiento que se quiere controlar con respecto al costo de mantenimiento por facturación.
- b. Indicador Costo Relativo Con Personal Propio: Es el porcentaje del costo de mano de obra de la empresa invertida con respecto a las tareas de mantenimiento y al costo total.
- c. Indicador Costo Relativo Con Material: Está relacionado con el porcentaje invertido en materiales en relación al costo total.

Definir correctamente los indicadores de mantenimiento es un aspecto importante en la implementación de un sistema de gestión. Esta decisión es crucial y primordial para el control de los objetivos y tareas de la unidad de mantenimiento. Estas acciones se realizan para acertar en la elección y eliminar las prácticas negativas que afecten la eficacia del sistema de gestión, en este sentido se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Los indicadores deben ser medibles y fáciles de analizar. Es de mucha ayuda

tener en cuenta una base de datos histórica para definir objetivos congruentes con las estrategias de la empresa.

- Suponen registrar la tendencia de los datos para realizar predicciones y orientar las acciones correctivas cuando ocurren desviaciones.
- Un indicador no se mira desde la perspectiva de ser una herramienta para controlar la gestión de arriba hacia abajo, ni tampoco desde su utilidad para identificar vulnerabilidades. Esto podría ser un obstáculo para la recogida de datos.
- La implementación debe enfocarse en la creación de una gestión orientada al aprendizaje que aporte información, favorezca la toma de decisiones y establezca la motivación.
- Los indicadores deben ser parte de la cultura del equipo de trabajo y del trabajo grupal, transformándose en una herramienta de participación y mejora sistemática. Para dar cumplimiento de este objetivo es importante que los indicadores se comprendan por todos los trabajadores implicados.
- En el momento de aplicar un indicador se deben tener presente los estándares internacionales para el uso del benchmarking en el futuro.

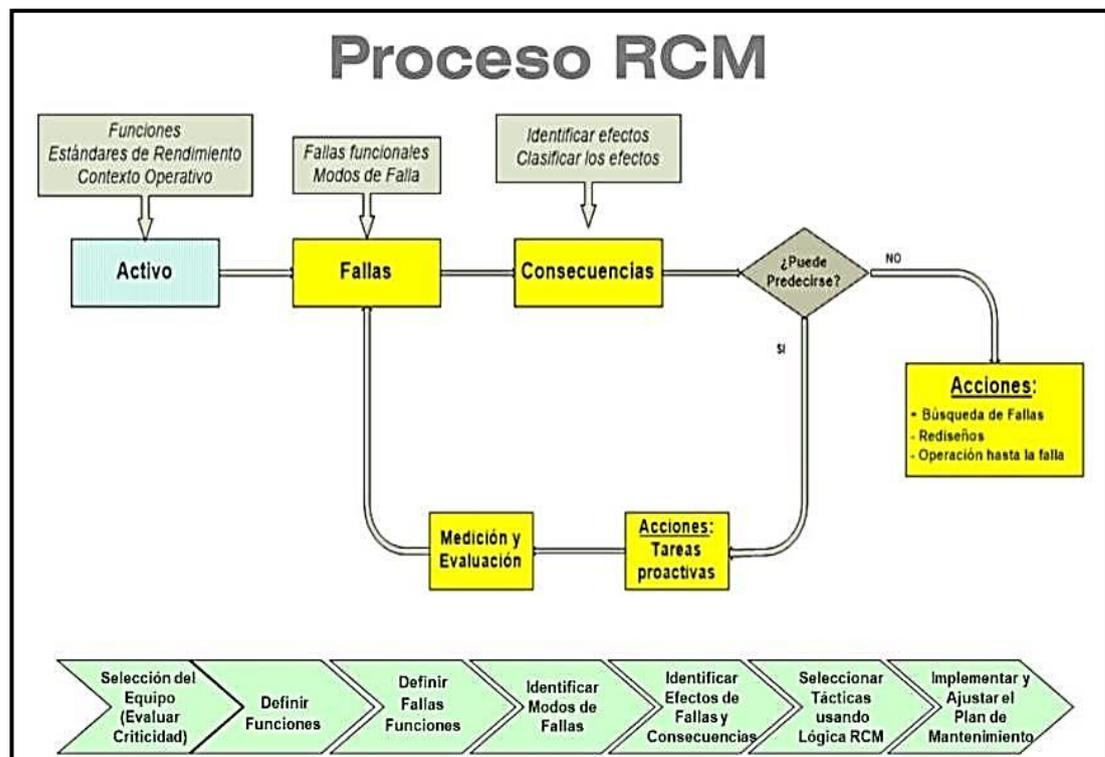
## 2.1.5 Proceso de Mantenimiento Centrado a la Confiabilidad

El proceso para aplicar el mantenimiento centrado en la Confiabilidad son los siguientes, tal como se aprecia en la Figura 6.

- Selección del equipo a evaluar
- Definir funciones
- Definir fallas funcionales
- Identificar modos de fallas
- Identificar efectos de fallas y consecuencias
- Seleccionar tácticas usando lógica RCM
- Implementar y ajustar el plan de mantenimiento

**Figura 6**

*Proceso de mantenimiento centrado en la confiabilidad*



*Nota.* En la figura se muestra el proceso centrado en la confiabilidad.

**Fuente:** RCM Mantenimiento centrado en la confiabilidad Moubray, J. (2004).

### **2.1.6 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad**

El mantenimiento centrado en Confiabilidad (MCC), o Reliability- centred Maintenance (RCM), ha sido utilizado por muchas empresas en todo el mundo. Estas empresas utilizan RCM para establecer las actividades de mantenimiento de su equipamiento, incluyendo la industria minera de gran tamaño, generación eléctrica, petróleo y derivados, metalmecánica, etc. La norma SAE JA1011 incluye los requisitos que debe seguir un proceso para ser llamado un proceso RCM.

De acuerdo con Valentín, N. (2014), y de acuerdo con los criterios de La Reliability - Centred Maintenance (RCM) indica en muchos de los conceptos e indicadores del mantenimiento que la mayor cantidad de fallas ocurren al envejecer el equipo, cuando se demuestra que no cumple sus funciones y las pérdidas no reflejan las cifras reales de producción.

A continuación, y de acuerdo a la literatura consultada se analizan varios conceptos que emanan del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad:

- a) El contexto operacional: Antes de detallar las funciones reglamentadas para el equipo que se está analizando, se debe entender muy bien el contexto en el que está en funcionamiento. A manera de ejemplo, dos equipos iguales funcionando en distintas industrias, pueden poseer planes de mantenimiento diferentes, si sus ambientes de funcionamiento de operación son diferentes, los componentes de los equipos y su gestión de mantenimiento serán diferenciados por aspectos humanos operativos y un mantenimiento diferenciado. Un

ejemplo común el sistema de reserva, que requiere operaciones de mantenimiento muy diferentes a un sistema principal, aun siendo sistemas físicamente idénticos. Antes de analizar el mantenimiento enfocado en la confiabilidad es preciso describir el contexto operacional, en esta descripción se debe indicar: el programa de operación del equipo, la disponibilidad de personal y de componentes de repuestos, las consecuencias de la no disponibilidad, la recuperación de producción en horas extra, los objetivos de calidad, seguridad industrial y medio ambiente, etc.

- b) Funciones: El análisis de RCM empieza con la definición de las funciones deseadas. En un ejemplo la función de una bomba se define como. Bombear más de 500 litros/ minuto de agua". Pero, la bomba puede poseer otras funciones, como contener el agua y la prevención de pérdidas. En un análisis de RCM, todas las funciones deberán ser analizadas y detalladas.
- c) Fallas funcionales o estados de fallas: Las fallas funcionales y los estados indeseables de una bomba y de acuerdo con las observaciones de un par de estados de avería, podrían no bombear agua, bombea menos de 500 litros/minuto. No está en la funcionalidad de contener el agua. Los estados de fallas se relacionan estrechamente con las funciones deseadas, cuando se identifican en su totalidad, la identificación de las fallas funcionales es un problema sin importancia.

d) Modos de fallas: Es una forma en que la falla del equipo puede alcanzar un estado de falla. Por ejemplo, un impulsor desgastado, en este caso un modo de falla, provoca que una bomba alcance el estado de falla funcional, donde se logra identificar que bombea un flujo menor de lo establecido. Una falla funcional en la mayoría de las ocasiones puede tener más de un modo de falla. Los modos de falla relacionados a una falla funcional deben ser detectados en el análisis de RCM. Al evaluar los modos de falla de un activo o sistema, es importante determinar la causa raíz principal de la falla. A manera de ejemplo, si se están estudiando los modos de falla de los rodamientos de una bomba, no es correcto enunciar el modo de falla de otros componentes del mismo sistema que pueden estar interfiriendo en la falla, puede ser que la causa es que el modo de falla enunciado no aporta información clara del porque está ocurriendo la falla.

Si no se sistematiza la observación de mantenimiento podrían estar presentes otras causas, como por ejemplo los bajos niveles de lubricación, el desgaste por uso normal, por una instalación inadecuada, entre otras. Se nota evidentemente que estas causas que subyacen a la falla aportan una idea clara de por qué ocurre, y sugieren las acciones a seguir para gestionar una lubricación de forma correcta, análisis de la vibración, entre otros, en algunas ocasiones, puede ser correcto enunciar el modo de falla como " falla de rodamiento", según el ambiente operativo en el que trabaje el activo o equipo es crucial saber sobre el contexto operacional.

- e) Los efectos de fallas: Para cada modo de falla deben identificarse los efectos de falla asociados, se debe realizar una breve descripción de lo que sucede (fecha o tiempo de cuando ocurre en el sistema). Al referirse a una bomba centrífuga, el efecto de falla vinculado con el modo de falla del impulsor con desgaste podría ser: el impulsor tiene desgaste y como ya no cumple su función, disminuye el nivel del tanque de concentrados, hasta que se activa la alarma de bajo nivel de control. Así mismo, podría ser el tiempo que se utilizará para identificar y solucionar la falla (sustituir el impulsor), puede llegar a ser de 6 horas. Debido a que el tanque se vacía después de 4 horas, el proceso aguas abajo debe pararse durante 2 horas, son tiempos que se debe tomar en cuenta para la productividad del equipo. No es probable que se puede recuperar la producción perdida por una adecuada gestión de mantenimiento, por lo que el tiempo de parada representa una pérdida de ingresos significativos. Los efectos de falla en la sistematización de error y fallos deben expresar claramente cuál es la relevancia que tendría en caso de suceder.
- f) Equipo natural de trabajo. De acuerdo con Li y Mescua (2016), en sus estudios realizados, un equipo natural de trabajo en los procesos de mantenimiento y control de los equipos, es un grupo de profesionales y técnicos con distintas funciones en la empresa que laboran por un plazo de tiempo, con el objetivo de analizar los problemas de cada área, para este caso el equipo de mantenimiento, donde cada persona del equipo comparte sus experiencias, conocimientos para la aplicación del RCM.

Un buen equipo de trabajo es muy importante en el del proceso, y para iniciar el análisis RCM, cada responsabilidad es relevante dentro del equipo. El rol facilitador es un ejemplo, este es el encargado de conducir el proceso durante todas las etapas del análisis de mantenimiento, asegurando que se ejecute de forma sistemática y ordenada. Dentro de las tareas más relevantes que el facilitador debe ejecutar son:

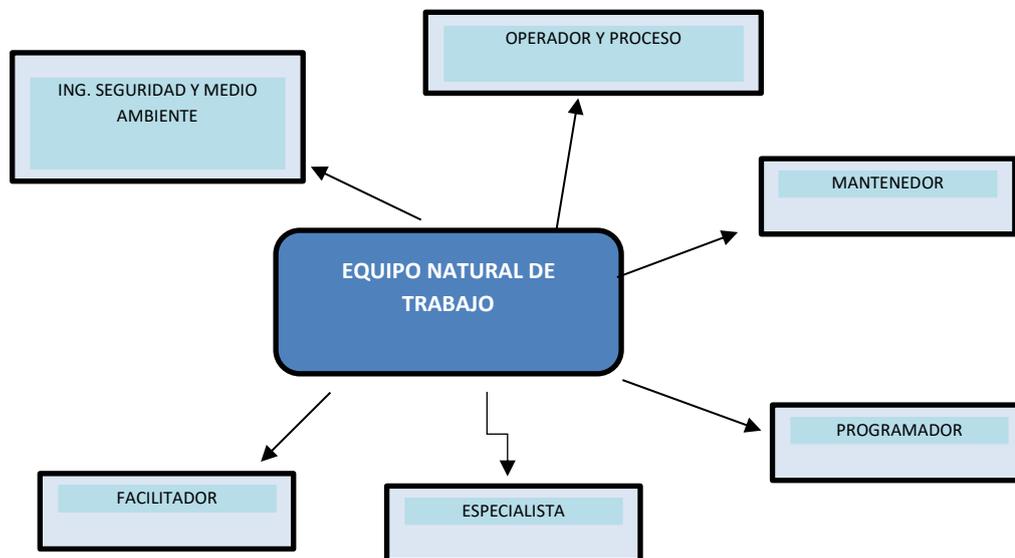
- Conducir al equipo de trabajo en la aplicación del AMEF y con mayor énfasis en la selección de las tareas de mantenimiento.
- Ayudar a la identificación de los activos que son susceptibles de ser analizado bajo el RCM, es decir los activos críticos.
- Ayudar en la decisión del nivel de detalle en que debe realizarse el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF).
- Asegurar el consenso entre las personas de operaciones y de mantenimiento.
- Hay que asegurar que todos los documentos a registrar en el proceso de RCM sea llevada de forma correcta.

El facilitador debe poseer las siguientes cualidades:

- Alta capacidad para los análisis
- Elevado liderazgo, habilidades para conducir reuniones en el trabajo,
- Facilidad para la comunicación,
- Manejar la teoría del RCM.
- Dominar las técnicas de gestión de actividades de mantenimiento, entre otras.

**Figura 7**

Esquema de equipo natural de trabajo



Nota. Equipo natural de trabajo y sus elementos

**Fuente:** *Implantación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a los hornos convertidores Pierce Smith de la fundición de cobre de Southern Copper Corporation. Córdova (2005).*

#### g) Objetivos del RCM

De acuerdo a Li y Mescua (2016) los objetivos constituyen un conjunto de procesos que contribuyen a la creación de capacidades para competir con enfoque a las operaciones de la organización. Estos contribuyen a mejorar de los sistemas productivos y su capacidad de respuesta, reducción de costes operativos y al mantenimiento de los equipos para el logro de mayores niveles de producción. Los objetivos tienen el propósito de que en las tareas cotidianas los equipos funcionen sin averías y fallos, contribuyendo a la eliminación de toda clase de pérdidas, a la mejora de la fiabilidad y al aprovechamiento de la capacidad instalada.

#### h) Beneficios del RCM

De acuerdo con la literatura consultada la utilización del RCM es importante porque aporta mucha más seguridad y mayores niveles de producción debido a:

- Perfeccionamiento del mantenimiento de los dispositivos de seguridad.
- La ubicación de nuevos dispositivos de seguridad.
- La supervisión sistemática de los efectos de cada falla antes de clasificarla como cuestión operacional.
- Estrategias concretas para la prevención de los modos de falla que afectan la seguridad y para las acciones “a falta de” que se tomen si no se encuentran tareas sistemáticas apropiadas. Mejores rendimientos operativos, debido a:
  - Mayor enfoque en los requisitos del mantenimiento de elementos y componentes críticos.
  - Un diagnóstico más ágil y oportuno de las fallas con referencia a los modos de falla vinculados con la función y los análisis de sus efectos.
  - Se obtienen menores daños secundarios a continuación de las fallas de poca relevancia.
  - Intervalos amplios entre las revisiones y en algunos casos la eliminación de ellas.
  - Trabajos de interrupciones más breves, que logran paradas más cortas, fáciles de solucionar y a un bajo costo.
  - Menos dificultades de “desgaste de inicio” después de las interrupciones cuando se eliminan las revisiones innecesarias.

- La eliminación de componentes fiables.
- Un conocimiento sistemático acerca de la nueva planta.
- Mayor control de costos del mantenimiento, debido a:
  - Menor mantenimiento rutinario no necesario.
  - Mejores adquisiciones de servicios de mantenimiento (motivada por el énfasis sobre las consecuencias de las fallas).
- Unas políticas de funcionamiento más transparentes, sobre todo en los equipos de reserva.
- Menor necesidad expertos, porque todo el personal conoce las plantas.
- Políticas más claras para adquirir nueva tecnología para el mantenimiento, tal como equipos de monitorización de la condición “
- Más larga vida útil de los equipos, debido al aumento del uso de las técnicas de mantenimiento “a condición”.

i) Pasos para el RCM Efectivo

- Seleccione el equipo para revisión.
- Defina las funciones.
- Defina los estándares de rendimiento.
- Defina como puede fallar (falla funcionales y análisis de los efectos).
- Determine los modos de falla.
- Analice la causa raíz.
- Analice los efectos y consecuencias.
- Seleccione las estrategias del mejor mantenimiento.

- Implemente el programa.
- Analice los resultados

De acuerdo a las investigaciones de Zegarra, M. (2016), se considera que las actividades de mantenimiento preventivo tratan de mejorar la disponibilidad del sistema operativo. Se trata de encontrar aquellas predicciones que indican que una falla ocurrirá utilizando técnicas para identificar una falla funcional, permitiendo la intervención, los componentes se dejan funcionando según las normas de funcionamiento deseado.

Producto de las observaciones, la falla induce a la reparación de la componente una vez sufrida una falla, esto solo se justifica si el costo de la falla (directo e indirecto) es más pequeño que el costo de la prevención, esta tarea se ejecutara solo si no se presentan problemas en seguridad y el medio ambiente. En caso contrario, es necesario actuar para reducir, reparar y disminuir las consecuencias de la falla.

j) Características del RCM

De acuerdo con las investigaciones de Zegarra, M. (2016), se coincide que la inspección de mantenimiento riguroso y sistemático permiten enfocar en un equipo en funcionamiento. La unidad de mantenimiento observara la maquinaria crítica para los procesos de la empresa y también en el costo de reparación con relación al costo de reemplazo. Esta decisión tendrá en cuenta el dinero gastado al largo de la funcionalidad institucional en mantenimientos anteriores, para determinar el equipo que debe revisarse o repararse.

El mantenimiento en este proceso implica un análisis profundo de la situación del equipo para identificar las causales de un mal funcionamiento para desarrollar las tareas operativas. Existen muchas formas en las que un equipo puede fallar, los estándares de funcionamiento permitido puede registrarse en escalas de aceptabilidad, entre estos pueden ser: la velocidad productiva por debajo de lo planificado produciendo un rendimiento deficiente o defectuoso, funciones no completas o puede ser que el activo esté trabajando en lo que no fue diseñado. Por consiguiente, se hace relevante e importante determinar que componente o cuál es el problema antes de encontrarle solución.

De acuerdo con Muñoz (2017) establece que el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad y cuando se utiliza adecuadamente, puede lograr mejorar significativamente la operatividad del equipo y el rendimiento de la planta.

### **2.1.7 Análisis de Confiabilidad de un Sistema de Bombeo**

#### **2.1.7.1 Confiabilidad $R(t)$**

De acuerdo con Reyes y Ocampo (1996), la confiabilidad  $R(t)$  de un componente en el instante  $t$ ,  $R(t)$ , está representada la posibilidad de que un elemento no falle en el intervalo  $(0, t)$ , debido a que era nuevo o como nuevo en el instante  $t=0$ . Un componente o componentes pueden presentar varios tipos de confiabilidades en el análisis, estas están asociadas a diferentes funciones en el sistema operativo del sistema de Bombeo.

Según la teoría consultada la confiabilidad se relaciona con la tasa de fallas o en la cantidad de fallas, con el tiempo de operación. Siempre que el número de fallas aumente o mientras el tiempo medio de operación de un equipo baje, la confiabilidad será la menor variable a modelar en Tiempos Operativos

#### **2.1.7.2 Métodos para el análisis de riesgo**

Aunque existen varias técnicas de análisis de riesgo a nivel mundial, nos referiremos a dos muy conocidas.

- a) Análisis o evaluación de riesgo.
- b) AMFE (Análisis de modo y efecto de falla potencial)

#### **Análisis o Evaluación de Riesgo**

Es el conjunto de procesos a través de los cuales se calcula la probabilidad de ocurrencia del error o falla de un suceso no deseado y la identificación de probables efectos negativos en los procesos o en el producto. La exposición al riesgo y sus efectos se presenta en periodos planificados del sistema, como, por ejemplo: los requeridos en la prestación del servicio y la fabricación del producto.

En el momento de la operatividad y el sistema de seguimiento y control se deben considerar los riesgos del sistema, especialmente:

- a) La naturaleza
- b) La facilidad de detección
- c) La exposición del agente (receptor) al efecto del riesgo.
- d) La probabilidad de ocurrencia del suceso.
- e) La severidad del impacto.

Deben ser tenidas en cuenta un conjunto de acciones preventivas para mitigar el impacto generado dentro de los procesos, se hace necesario un Plan de mantenimiento en este proceso.

El Plan de mantenimiento de los equipos operativos reúne a través de un sistema confiabilidad, es un conjunto de acciones preventivas, que se orientan a asumir el tratamiento del riesgo a la no conformidad potencial. Pero el riesgo no desaparece, siempre habrá factores externos que están presentes como factores desconocidos y que impidan que deje de existir.

### **Análisis modal de fallos (AMFE)**

De acuerdo Copiman (2021), la Revista Predictiva<sup>21</sup>, sostiene que es una técnica muy eficaz para la identificación, evaluación y prevención de los fallos potenciales que pueden afectar un proceso, producto o servicio. En este caso, servirá para valorar el funcionamiento del sistema de bombeo.

Con la detección es inicial y a tiempo de los puntos críticos y la aplicación de las medidas para prevenir los fallos potenciales del equipo, aumentando la fiabilidad y productividad. Asimismo, establece las siguientes características.

- a) **Carácter preventivo:** adelantarse a la ocurrencia de un fallo, en los que permita la actuación preventiva ante los posibles problemas.
- b) **Sistematización:** el enfoque estructurado seguido para la aplicación de un AMFE asegura, que todas las posibilidades de fallar se consideran.
- c) **Guía en la priorización:** la metodología del AMFE ayuda a la priorización de las acciones utilizadas para anticiparse a los problemas con

información para resolver conflictos entre acciones con efectos contrapuestos.

- d) Participación: la realización de un AMFE es un trabajo de equipo, que necesita compartir los conocimientos de todas las áreas afectadas.
- e) Aplicación: el AMFE se aplica en nuevos desarrollos, nuevos procesos o servicios, y nuevas condiciones de uso para productos existentes.

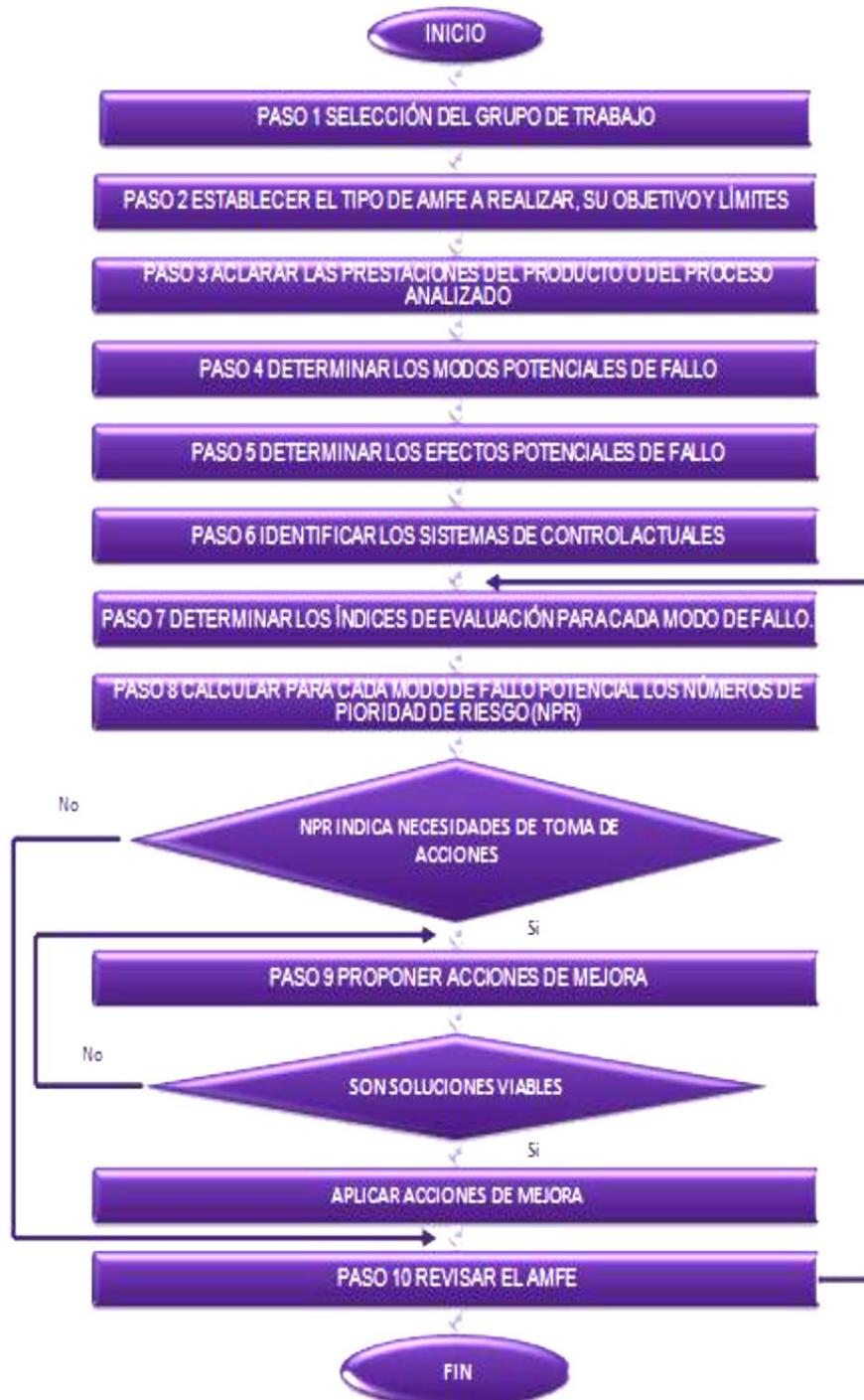
Así mismo, define los siguientes términos utilizados:

- a) Cliente: se asigna la categoría de cliente tanto al usuario final (cliente externo) como el cliente interno de la siguiente operación o fase del proceso (cliente interno).
- b) Fallo: un producto, servicio o proceso presenta fallas cuando no lleva a cabo, de forma satisfactoria, la función que de él se espera (función).
- c) Modo potencial de fallo: es la forma en que es posible que un producto, servicio o un proceso falla. (Ej. Rotura, deformación, dilación, etc.)
- d) Efecto potencial de fallo: es la consecuencia de la ocurrencia de un fallo, tal y como las experimenta el cliente (Ej. Deformación no funciona, dilación perdida del tren).

Los pasos de este proceso se detallan en la figura 8:

**Figura 8**

Pasos del Análisis modal de fallos (AMFE)



**Nota.** Pasos a seguir para realizar el análisis modal de fallos (AMFE)

**Fuente:** Diagrama de "Herramientas de la calidad", Asociación Española para la calidad 2002

De acuerdo con el Comité Panamericano de Ingeniería de Mantenimiento, COPIMAN (2021), la Revista Predictiva<sup>21</sup> Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de un Sistema de Bombeo, las industrias dedicadas a este rubro en los últimos años se han enfocado en aumentar los ingresos, manejando para ello diferentes enfoques que le ayuden a la toma de decisiones en inversiones acertadas y muy rentables. Las grandes empresas en la Gerencia Integral de Activos centrados en un plan de mantenimiento, valoran los niveles de riesgo para describir los escenarios posibles, son sin lugar a dudas un ejemplo fehaciente, en este contexto cada una de ellas presenta como objetivo implícito o explícito invertir millones de dólares para disminuir los gastos que no se esperan y con un plan de mantenimiento y confiabilidad aumentar la productividad y los niveles de ganancias para las industrias, el análisis RAM permite la predicción para un tiempo determinado la disponibilidad y el factor productivo diferido de un proceso, sistema o proceso, basado en su configuración, en el análisis de fiabilidad de sus componentes del equipo, en la operación y mantenimiento y fundamentalmente de los muchos componentes del sistema, basada en información que proviene de bases de datos propias o genéricas de la industria y en la experiencia de expertos profesionales en este sistema.

El equipo de trabajo propuesto garantizará y determinará las premisas relevantes que se vinculan a la base de datos que aporta la información de confiabilidad del equipamiento, teniendo en cuenta todas las fuentes viables

de información para elaborar una base de datos y obtener una buena estimación de los equipos que están funcionando.

Así mismo, establece que el análisis RAM es útil para evaluar las sensibilidades entre la capacidad que se encuentra instalada y la establecida, analizar los cambios en el programa de mantenimiento, etc.; permitiendo identificar diferencias con respecto a determinada condición, planificar opciones para redimensionar y generar los programas de acción que lleven al cumplimiento de los compromisos contraídos de producción y con la seguridad necesaria. El análisis RAM, comienza con estimar las posibles tasas de falla y de reparación todos los componentes o equipamiento que forman parte de los sistemas que se estudian. Esta estimación de falla contribuye a un modelo de Diagramas de Bloques de Disponibilidad (DBD). Estos modelos representan la arquitectura del sistema y su filosofía operativa, que se soporta en un modelo de para la simulación que tiene en cuenta la configuración del equipamiento, las fallas aleatorias, las reparaciones, el mantenimiento según plan, las paradas parciales y totales de los componentes del sistema.

También se resalta que durante la implementación de un análisis RAM, se realiza la adecuada identificación las probabilidades de los procesos de deterioro o fallo que pueden afectar el funcionamiento de los equipos, subsistemas y sistemas vinculados al proceso productivo con el fin de predecir la mayor parte de los escenarios posibles de fallas. Producto de esto los resultados que se obtienen, tienen en cuenta las acciones para atenuar los

fallos en los escenarios descritos y también identificar cada implicación de cada escenario, siempre y cuando se base en las buenas prácticas de análisis, tal como lo establece la norma internacional en sus requerimientos. Todo esto con el objetivo de contribuir al establecimiento de las estrategias necesarias para la gestión del mantenimiento y su productividad.

### **Modelo General del Análisis RAM**

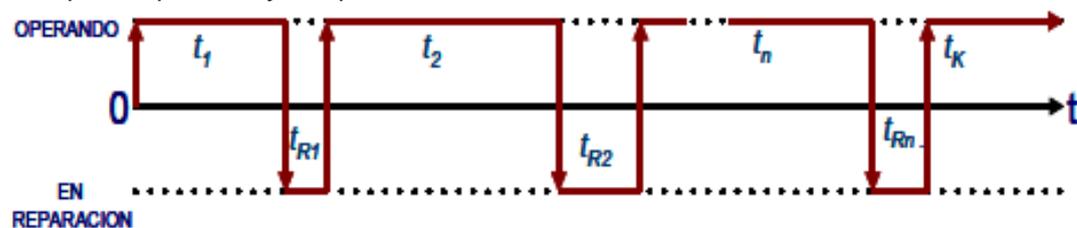
De acuerdo con Reyes Y Ocampo (1996), Para llevar a cabo el análisis correspondiente el sistema de funcionamiento de los equipos la probabilidad se describe de manera exacta los parámetros que afectan de forma directa a la confiabilidad, sistematizar a través de fichas consensuadas en el uso validados a nivel internacional, deberá considerar ciertos parámetros que se encuentran en el ambiente operativos, la temperatura y presiones, entre otros que influyen directamente en el sistema. La confiabilidad como técnica para desempeño óptimo de los equipos, se ocupa fundamentalmente de las fallas o errores de los sistemas operativos, no obstante, no indaga tanto en las incidencias que las causan como en la frecuencia y tiempos con que ocurren, es una teoría de la estadística, donde los datos que se obtienen en el estudio son fundamentalmente los tiempos vinculados al activo, los cuales tienen un papel fundamental.

### 2.1.7.3 Disponibilidad

La disponibilidad es un concepto predictivo de los equipos que son reparables que se manifiesta no como la probabilidad de que el equipo esté en funcionamiento, o sea, que no esté reparado en un tiempo “t”. Para la estimación de la disponibilidad se debe estimar en el tiempo la tasa de falla  $\lambda(t)$  y la tasa de reparación  $\mu(t)$ ; se requiere analizar estadísticamente los tiempos para la falla, y los tiempos en reparación. Para un periodo de tiempo “t”.

**Figura 9**

*Tiempo de operación y tiempo fuera de servicio*



*Nota.* Diagrama de tiempo de operación y fuera de servicio.

**Fuente:** Reyes Y Ocampo (1996)

Estas son las fases en las cuales se debe desarrollar un estudio RAM.

1. Evaluación general del sistema.
2. Diseño del arreglo físico del sistema.
3. Revisión de referencias internacionales y/o históricos reales del sistema.
4. Estimado de la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema.
5. Estimado de la capacidad efectiva del sistema.
6. Conclusiones y recomendaciones.

La disponibilidad es una función que permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. A través del estudio de los factores que influyen sobre la disponibilidad, el TPPF y el TPPR, es posible para la gerencia evaluar distintas alternativas de acción para lograr los aumentos necesarios de disponibilidad. La disponibilidad del equipo se define como:

$$D = \frac{\text{Tiempo medio entre fallas}}{\text{Tiempo medio entre fallas} + \text{Tiempo medio para reparar}}$$

$$D = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

#### **Tiempo Promedio para Fallar (TPPF) – Mean Time To Fail (MTTF)**

Este indicador mide el tiempo promedio que es capaz de operar el equipo a capacidad sin interrupciones dentro del período considerado; este constituye un indicador indirecto de la confiabilidad del equipo o sistema. El Tiempo Promedio para Fallar también es llamado “Tiempo Promedio Operativo” o “Tiempo Promedio hasta la Falla”. (Ramírez y Moreno, 2017)

#### **Tiempo Promedio para Reparar (TPPR) – Mean Time To Repair (MTTR)**

Es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio por un fallo, dentro de un período de tiempo determinado. El Tiempo Promedio para Reparar es un parámetro de medición asociado a la

mantenibilidad, es decir, a la ejecución del mantenimiento. La mantenibilidad, definida como la probabilidad de devolver el equipo a condiciones operativas en un cierto tiempo utilizando procedimientos prescritos, es una función del diseño del equipo (factores tales como accesibilidad, modularidad, estandarización y facilidades de diagnóstico, facilitan enormemente el mantenimiento). Para un diseño dado, si las reparaciones se realizan con personal calificado y con herramientas, documentación y procedimientos prescritos, el tiempo de reparación depende de la naturaleza del fallo y de las mencionadas características de diseño. (Ramírez y Moreno, 2017)

### **Mantenimiento Estratégico**

La evaluación de los criterios de mantenimiento a ser aplicados, depende normalmente del análisis de disponibilidad frente a la necesidad de utilización del equipo, no obstante se deben observar otros aspectos, como su importancia en la actividad objeto de la empresa, el costo de mantenimiento con relación al inmovilizado (costo acumulado de mantenimiento con relación al costo de adquisición del equipo), el tiempo medio entre fallas, el tiempo medio para reparación, la obsolescencia del equipo, las condiciones de operación a que son sometidos, los aspectos de seguridad y los aspectos de medio ambiente. Considerando un conjunto de ítems (equipos, obras o instalaciones) fundamentales en una línea de proceso o servicio, donde sus mayores disponibilidades tienen relación homogénea con mayor productividad y consecuente producción de utilidades para la empresa, en la evaluación de

los puntos críticos pueden ser encontradas las siguientes condiciones:

(Tavares, s.f.)

- Ítems en serie: La disponibilidad final será obtenida por el producto de las disponibilidades de cada ítem.

$$D_c = D_1 \times D_2 \times D_3 \times \dots \times D_n$$

- Ítems en paralelo: La disponibilidad final, será obtenida por la suma de los productos de las disponibilidades de cada ítem por sus capacidades de producción, dividido por el producto de las capacidades de producción de esos ítems.

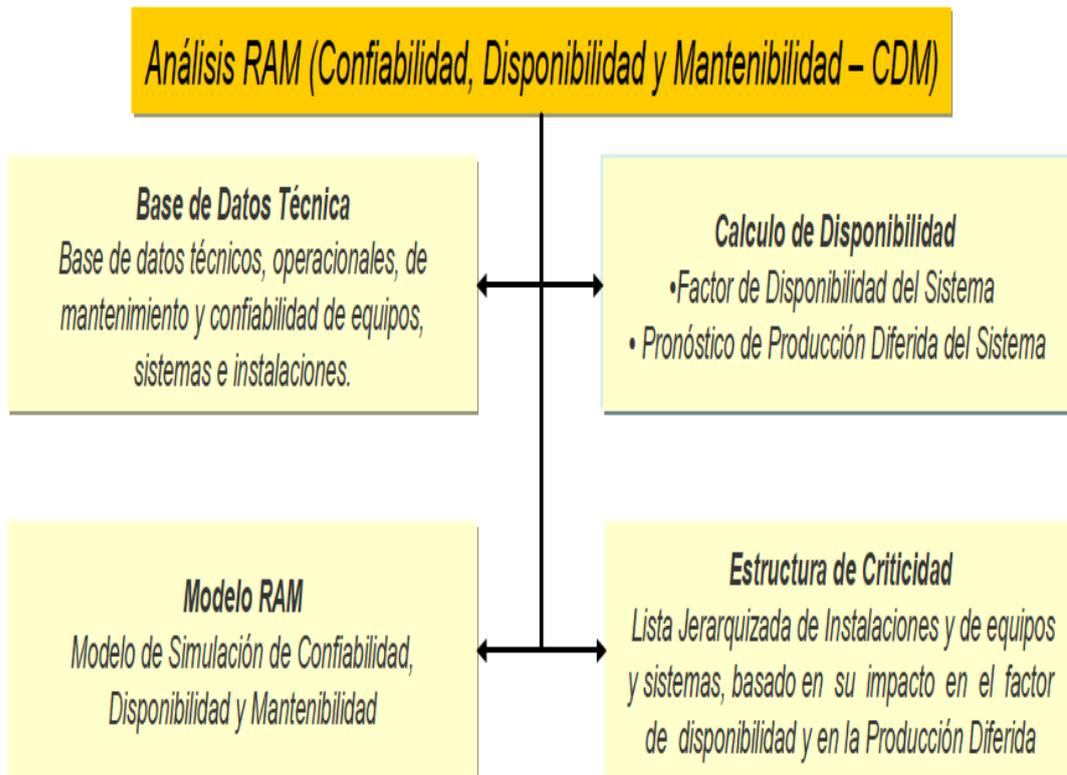
$$D = \frac{D_{1XP1} + D_{2XP2} + D_{3XP3} + \dots + D_{nXPn}}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}$$

- Ítems redundantes La disponibilidad final, será obtenida por la diferencia entre la unidad y los productos de la diferencia de la unidad con la disponibilidad de cada ítem.

$$D_s = 1 - (1 - D_{R1}) \times (1 - D_{R2}) \times (1 - D_{R3}) \times \dots \times (1 - D_{Rn})$$

**Figura 10**

*Análisis RAM*



*Nota.* Resultados del Análisis RAM.

**Fuente:** Resultados del Análisis RAM, Reyes Y Ocampo (1996)

## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1 Mantenibilidad**

Según el estándar ISO 14224, (2006) la mantenibilidad es la capacidad de un equipo que, en condiciones de uso específicas, puede restablecerse hacia un estado en el que lograra realizar la función requerida, en caso de que el mantenimiento se realice en las condiciones dadas y utilizando los procedimientos y recursos establecidos.

### **2.2.2. Planta**

Instalación industrial de procesamiento de mineral que tiene como finalidad obtener el concentrado de hierro.

### **2.2.3 Equipo**

Conjunto de componentes que tienen una finalidad dentro de un sistema estructural, trituración, hidráulico, transporte, vibración, lubricación o transmisión.

#### **2.2.4 Sistema**

Conjunto de equipos que están relacionados y que forman parte de una estructura mayor, cada uno de estos equipos contribuyen al logro de un objetivo o propósito.

#### **2.1.5 Concentrado**

Mezcla de mineral y agua que se presenta durante el proceso, contiene una proporción de 60% de sólidos de mineral con 40% de agua.

#### **2.2.6 Torta**

Forma que adquiere el mineral luego del proceso de filtración, donde la composición es de aproximadamente 92% sólidos y 8% de agua.

## **CAPITULO III. HIPOTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

### **3.1 Hipótesis**

La evaluación de la confiabilidad del sistema de bombeo de concentrado de hierro optimizara el rendimiento de los equipos.

### **3.2 Operacionalización de variables**

Variables:

- Variable Independientes (VI): Evaluación de la confiabilidad del sistema de bombeo de concentrado de hierro.

Indicadores: MTTF, MTBF.

- Variable Dependiente (VD): El rendimiento de los equipos.

Indicadores: Disponibilidad.

## **CAPITULO IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **4.1. Tipo y diseño de la investigación**

A continuación, se detallan los tipos de investigación desde tres puntos de vista:

#### **A. Según su enfoque**

El trabajo de investigación será elaborado empleando como base el enfoque cuantitativo debido a que las variables del estudio no son modificadas y se muestran tal cual han sido observadas y analizadas.

#### **B. Según su alcance**

Es de tipo exploratorio, porque se realizan diversos análisis que ayudaran a optimizar el rendimiento de los equipos.

#### **C. Diseño de investigación**

Es de tipo No experimental, debido a que las condiciones de los componentes son intrínsecamente manipulables; tiene que limitarse a la observación y al análisis dada la incapacidad de influir sobre dichos componentes.

Las características epistemológicas más importantes de esta investigación son:

- Percepción de la realidad, esta investigación es objetiva, pues procesa la información tal cual se presenta en campo.
- Razonamiento, esta investigación es deductiva pues permite descubrir consecuencias desconocidas a partir del análisis de confiabilidad.
- Finalidad, esta investigación comprobará y confirmará los resultados de las observaciones y metodologías aplicadas.
- Orientación, esta investigación está orientada al resultado.

#### **4.2 Unidad de análisis**

El presente trabajo de investigación utilizara como unidad de análisis al sistemade bombeo de concentrado de hierro. Este sistema se ubica en las instalaciones de la minera Shougang Hierro Perú S.A.A, en el distrito de Marcona, provincia de Nazca, departamento de Ica.

### 4.3 Matriz de consistencia

**Tabla 2**

*Matriz de consistencia*

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
¿Cómo influye la evaluación de la confiabilidad y su impacto en el rendimiento de los equipos del sistema de bombeo de concentrado en una empresa minera de hierro?	Evaluar la confiabilidad y su impacto en el rendimiento de los equipos del sistema de bombeo de concentrado en una empresa minera de hierro.	La evaluación de la confiabilidad del sistema de bombeo de concentrado de hierro optimizara el rendimiento de los equipos.	El rendimiento de los equipos.	Evaluación de la confiabilidad del sistema de bombeo de concentrado de hierro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Horas totales de mantenimiento del equipo.</li> <li>➤ Horas de paradas por falla</li> <li>➤ Horas de operación</li> <li>➤ Disponibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Registro de actividades.</li> <li>➤ Registro de cambio de componentes.</li> <li>➤ Histórico de fallas.</li> <li>➤ Horómetros de los equipos.</li> </ul>

**Fuente:** *Elaboración propia*

## CAPITULO V. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 5.1 ELABORACIÓN DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

#### 5.1.1. Jerarquización De Equipos Críticos

Dentro de una planta concentradora, existen equipos de gran importancia tal que sus estados de falla repercuten en la economía, seguridad y medio ambiente de manera significativa. Por tanto, con el fin de evitar dichos riesgos o minimizar las consecuencias de ellos, se deben identificar dichos equipos para implementar un mantenimiento efectivo. El análisis de criticidad permite jerarquizar estos activos de acuerdo a unos criterios establecidos.

La Planta de Filtros, que es el sistema a evaluar en el presente trabajo, se encarga principalmente de reducir la humedad (8-9%) al concentrado de mineral proveniente de la planta de molienda, y consta de los siguientes equipos (tabla 3).

**Tabla 3**  
Equipos de la Planta Filtros

EQUPOS PLANTA FILTROS	
1	ESPESADOR DE CONCENTRADO
2	BOMBAS UNDERFLOW
3	BOMBAS OVERFLOW
4	DISTRIBUIDOR DE PULPA
5	FILTROS DE DISCO
6	TANQUES DE DRENAJE
7	BOMBAS DE VACIO
8	TANQUES DE AIRE
9	COMPRESOR DE AIRE
10	SECADOR DE REGENERACIÓN
11	TANQUES DE AIRE
12	TORRE DE ENFRIAMIENTO
13	BOMBAS DE REFRIGERACIÓN
14	BOMBA SUMERGIBLE
15	FAJAS TRANSPORTADORAS
16	STACKER BOOM

*Fuente: Elaboración propia*

El análisis de criticidad de los equipos está enfocado básicamente a los equipos que participan directamente en la producción de concentrado del mineral, y sus demás derivados, este análisis de criticidad también aplica a los equipos auxiliares.

Los equipos que se incluyeron dentro del estudio del análisis de criticidad fueron escogidos bajo la supervisión de ingenieros de producción y mantenimiento; para nuestro análisis se identificaron los 16 equipos más influyentes en el proceso de producción.

Se utilizará la tabla 4 de análisis de criticidad para determinar la criticidad de los activos. A continuación, se muestran los resultados del análisis de criticidad.

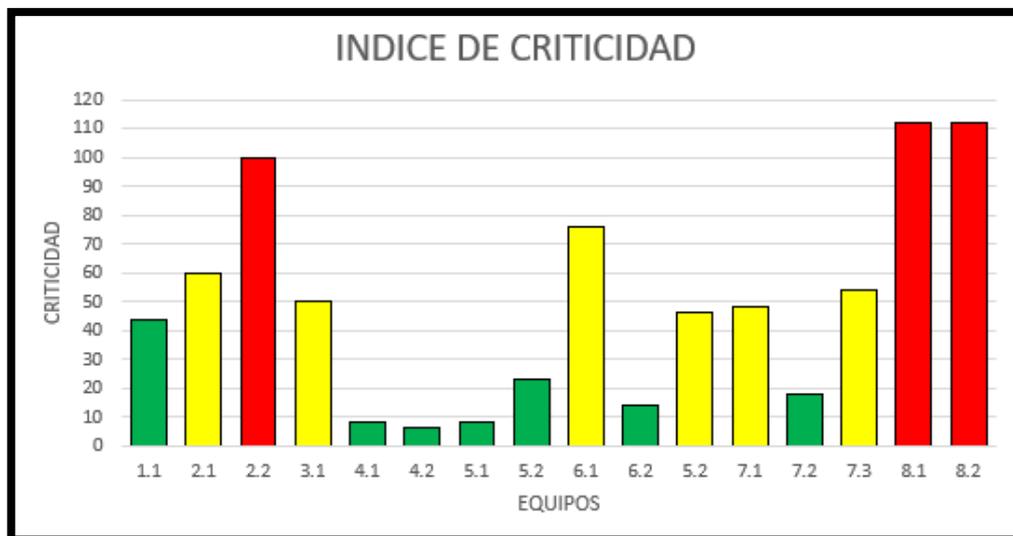
**Tabla 4**  
*Análisis de criticidad de la Planta Filtros*

AREA: PLANTA FILTROS		Frecu.	Impac. Operac.	Flexib.	Costo Mantto	S.A.H	Conse.	Criticidad	Matriz Riesgo
SISTEMA	EQUIPO								
<b>1. ESPESAMIENTO DE PULPA</b>									
	1.1 ESPESADOR DE CONCENTRADO	2	5	4	1	1	22	44	NC
<b>2. SISTEMA DE BOMBEO</b>									
	2.1 BOMBA UNDERFLOW	4	5	2	2	3	15	60	MC
	2.2 BOMBA OVERFLOW	4	5	4	2	3	25	100	C
<b>3. DISTRIBUCION DE PULPA</b>									
	3.1 DISTRIBUIDOR DE PULPA	2	5	4	2	3	25	50	MC
<b>4. FILTRADO</b>									
	4.1 FILTRO DE DISCO	2	1	2	1	1	4	8	NC
	4.2 TANQUE DE DRENAJE	1	1	2	1	3	6	6	NC
<b>5. GENERACIÓN DE VACIO</b>									
	5.1 BOMBA DE VACIO	2	1	2	1	1	4	8	NC
	5.2 TANQUE DE AIRE	1	7	2	1	8	23	23	NC
<b>6. COMPRESIÓN DE AIRE</b>									
	6.1 COMPRESOR DE AIRE	4	5	2	1	8	19	76	MC
	6.2 SECADOR DE REGENERACION	1	5	2	1	3	14	14	NC
	5.2 TANQUE DE AIRE	2	7	2	1	8	23	46	MC
<b>7. REFRIGERACIÓN</b>									
	7.1 TORRE DE ENFRIAMIENTO	3	5	2	1	5	16	48	MC
	7.2 BOMBA DE REFRIGERACION	1	5	2	1	7	18	18	NC
	7.3 BOMBA SUMERGIBLE	3	5	2	1	7	18	54	MC
<b>8. TRANSPORTE DE MINERAL</b>									
	8.1 FAJA TRANSPORTADORA	4	5	4	1	7	28	112	C
	8.2 STACKER BOOM	4	5	4	1	7	28	112	C

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 11**

*Diagrama de barras del índice de criticidad de los equipos del área de Filtros*



*Nota.* índice de criticidad de los principales equipos de la Planta de Filtros

**Fuente:** *Elaboración propia*

Del diagrama de barras (figura 11) se observa que en el área de Filtros los equipos de alto índice de criticidad son las fajas transportadoras, Stacker boom y la bomba de overflow. El presente trabajo está enfocado en el desarrollo de un mantenimiento centrado de confiabilidad de la bomba de overflow (bomba de concentrado de hierro) con la finalidad de mejorar su disponibilidad.

### 5.1.2. Criterios de criticidad

Según C. Parra & A. Crespo (2012), el modelo de Criticidad Total por Riesgo (CTR), es un proceso de análisis semicuantitativo, bastante sencillo y práctico, soportado en el concepto del riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de un fallo por la severidad del mismo.

A continuación, se presentan de forma detallada, las expresiones utilizadas para jerarquizar los sistemas a partir del modelo CTR:

$$\text{Criticidad total} = \text{Frecuencia de fallas} \times \text{Consecuencias}$$

Donde se supone además que el valor de las consecuencias, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Consecuencia} = ((\text{Impacto Operacional} \times \text{Flexibilidad}) + \text{Costos de Mantenimiento} + \text{Impacto Seguridad, Ambiente e Higiene})$$

Los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados por la expresión del riesgo se presentan a continuación:

### **Factor de Frecuencia de Fallos**

Se considera como el número de veces que falla un equipo, es un indicador importante para analizar de cuan eficiente es la estrategia de mantenimiento que se está ejecutando.

<b>Frecuencia de Fallos</b>	<b>Peso</b>
Frecuente: mayor a 2 fallas/año	4
Promedio: de 1 - 2 fallas/año	3
Buena: entre 0.5 - 1 fallas/año	2
Excelente: menos de 0.5 fallas/año	1

### **Factores de Consecuencias**

#### **Impacto Operacional**

La interrupción de la operación por causa de una falla en los equipos es un indicador importante, el cual nos indica que nuestros equipos no cuentan con un plan de mantenimiento estratégico.

<b>Impacto Operacional</b>	<b>Peso</b>
Perdidas de producción superior al 75%	10
Perdidas de producción entre el 75% y 50%	7
Perdidas de producción entre el 50% y 25%	5
Perdidas de producción entre el 25% y 10%	3
Perdidas de producción menor al 10%	1

### Impacto por Flexibilidad Operacional

Se considera si se cuenta con equipos en stand by, el alcance de los repuestos y tiempos de intervención del equipo.

<b>Flexibilidad Operacional</b>	<b>Peso</b>
No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.	4
Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.	2
Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.	1

### Impacto en Costes de Mantenimiento

Como consecuencia de las frecuencias de falla se generan gastos de reparación de los equipos, es importante este indicador ya que los costos elevados pueden ser controlados o disminuidos a través de una estrategia apropiada del mantenimiento.

<b>Costo de Mantenimiento</b>	<b>Peso</b>
Costes superiores a \$ 20000 dólares.	2
Costes inferiores a \$20000 dólares.	1

### **Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente**

La seguridad de las personas y los equipos es un indicador importante para definir la criticidad de los equipos, dentro del rubro minero se considera como uno de sus pilares importantes para el personal que labora en sus instalaciones y cuida.

El cuidado del medio ambiente es un criterio importante para la industria minera por lo tanto los equipos tienen que estar 100% operativos y confiables para no dañar el medio ambiente.

<b>Impacto en Seguridad, Ambiente e Higiene</b>	<b>Peso</b>
Afecta la seguridad humana tanto externa como interna y requiere la notificación a entes externos de la organización	8
Afecta el ambiente /instalaciones	7
Afecta las instalaciones causando daños severos	5
Provoca daños menores (ambiente -seguridad)	3
No provoca ningún tipo de daño a personas, instalaciones o al ambiente	1

Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo/sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias de los fallos y se ubican en la matriz de criticidad 4x4 (ver tabla 5). El valor de frecuencia de fallos se ubica en el eje vertical y el valor de consecuencias se ubica en el eje horizontal.

La matriz de criticidad mostrada a continuación permite jerarquizar los sistemas en tres áreas (ver tabla 6):

**Tabla 5***Matriz de criticidad*

		MATRIZ DE CRITICIDAD				
FRECUENCIA	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	MC	MC	C
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

*Fuente: C. Parra & A. Crespo (2012)***Tabla 6***Jerarquización de sistemas*

Área de sistemas No Critico	NC
Área de sistemas de Media Criticidad	MC
Área de sistemas Críticos	C

*Fuente: C. Parra & A. Crespo (2012)*

## **5.2 Análisis de Disponibilidad**

Para realizar el análisis de disponibilidad se examinaron los historiales de actividades de mantenimiento de los equipos en el periodo de julio, agosto y septiembre del año 2021 y 2022, donde podemos apreciar el histórico de fallas, ratio de componentes cambiados que afectaron la disponibilidad de la Planta.

Con esta información obtendremos la cantidad de fallos que presentaron los componentes y además el tiempo que tardo la intervención de mantenimiento.

Para lograr calcular la disponibilidad es necesario conocer bien toda la planta, así como los sistemas y los equipos que las conforman. Cabe resaltar que muchos de los sistemas son redundantes, es decir sistemas que cuentan con equipos en stand by, así como sistemas en paralelo, en este caso por las dos líneas de producción que la conforman.

Para comenzar a calcular debemos considerar la disponibilidad por cada uno de los sistemas en serie, así como las líneas en paralelo.

Ahora se calculará la disponibilidad de los meses de julio, agosto y septiembre del año 2021.

**Tabla 7**

*Disponibilidad en bombas de Underflow Periodo Julio 2021 (Línea 01 y 02)*

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba underflow 1001	744	0	100%
1	Bomba underflow 1002	666.22	77.78	89.55%
2	Bomba underflow 2001	744	0	100%
2	Bomba underflow 2002	738.37	5.63	99.24%

**Fuente:** *Elaboración propia*

La disponibilidad en este sistema es en serie, por lo que la disponibilidad para cada línea en el mes de julio sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{uf1001} \times D_{uf1002} = 1 \times 0.8955 = 89.55\%$$

$$D_{ln2} = D_{uf2001} \times D_{uf2002} = 1 \times 0.9924 = 99.24\%$$

**Tabla 8**

*Disponibilidad en bombas de Overflow Periodo Julio 2021 (línea 01 y 02)*

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba overflow 1001	734.09	9.91	98.67%
1	Bomba overflow 1002	731	13	98.25%
2	Bomba overflow 2001	744	0	100%
2	Bomba overflow 2002	744	0	100%

**Fuente:** *Elaboración propia*

La disponibilidad en este sistema es en serie, por lo que la disponibilidad para cada línea en el mes de julio sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{ov1001} \times D_{ov1002} = 0.9867 \times 0.9825 = 96.94\%$$

$$D_{ln2} = D_{ov2001} \times D_{ov2002} = 1 \times 1 = 100\%$$

**Tabla 9**

*Disponibilidad en bombas de Underflow Periodo agosto 2021 (Línea 01 y 02)*

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba underflow 1001	744	0	100%
1	Bomba underflow 1002	711.72	32.28	95.66%
2	Bomba underflow 2001	744	0	100%
2	Bomba underflow 2002	732.38	11.62	98.44%

**Fuente:** *Elaboración propia*

La disponibilidad en este sistema es en serie, por lo que la disponibilidad para cada línea en el mes de agosto sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{uf1001} \times D_{uf1002} = 1 \times 0.9566 = 95.66\%$$

$$D_{ln2} = D_{uf2001} \times D_{uf2002} = 1 \times 0.9844 = 98.44\%$$

**Tabla 10**

*Disponibilidad en bombas de Overflow Periodo agosto 2021 (línea 01 y 02)*

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba overflow 1001	741.83	2.17	99.71%
1	Bomba overflow 1002	712.23	31.77	95.73%
2	Bomba overflow 2001	743.42	0.58	99.92%
2	Bomba overflow 2002	676.97	67.03	90.99%

**Fuente:** *Elaboración propia*

La disponibilidad en este sistema es en serie, por lo que la disponibilidad para cada línea en el mes de agosto sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{ov1001} \times D_{ov1002} = 0.9971 \times 0.9573 = 95.45\%$$

$$D_{ln2} = D_{ov2001} \times D_{ov2002} = 0.9992 \times 0.9099 = 90.92\%$$

**Tabla 11**

*Disponibilidad en bombas de Underflow Periodo septiembre 2021 (Línea 01 y 02)*

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba underflow 1001	683.95	36.05	94.99%
1	Bomba underflow 1002	698.53	21.47	97.02%
2	Bomba underflow 2001	680	40	94.44%
2	Bomba underflow 2002	720	0	100%

**Fuente:** *Elaboración propia*

La disponibilidad en este sistema es en serie, por lo que la disponibilidad para cada línea en el mes de septiembre sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{uf1001} \times D_{uf1002} = 0.9499 \times 0.9702 = 92.16\%$$

$$D_{ln2} = D_{uf2001} \times D_{uf2002} = 1 \times 0.9444 = 94.44\%$$

**Tabla 12**

*Disponibilidad en bombas de Overflow Periodo septiembre 2021 (Línea 01 y 02)*

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba overflow 1001	706.72	13.28	98.16%
1	Bomba overflow 1002	720	0	100%
2	Bomba overflow 2001	716.3	3.7	99.49%
2	Bomba overflow 2002	686.17	33.83	95.30%

**Fuente:** *Elaboración propia*

La disponibilidad en este sistema es en serie, por lo que la disponibilidad para cada línea en el mes de septiembre sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{ov1001} \times D_{ov1002} = 0.9816 \times 1 = 98.16\%$$

$$D_{ln2} = D_{ov2001} \times D_{ov2002} = 0.9949 \times 0.9530 = 94.81\%$$

**Tabla 13**

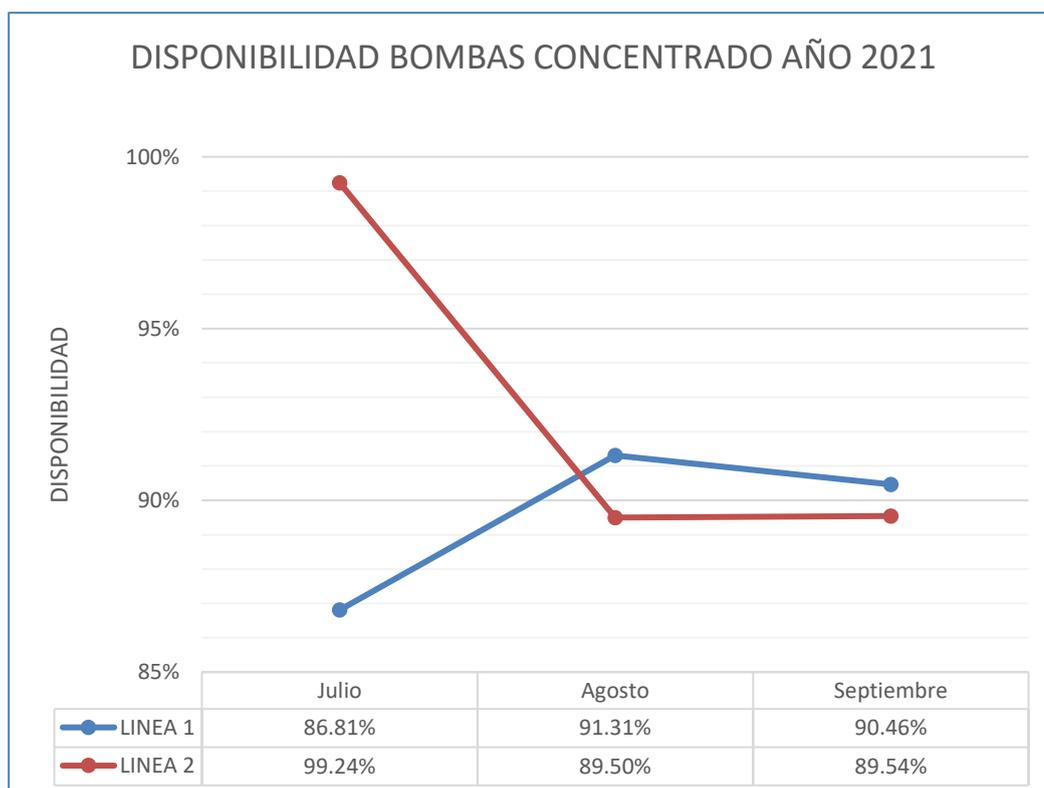
Disponibilidad en bombas de concentrado Año 2021 (Línea 01 y 02)

DISPONIBILIDAD BOMBA DE CONCENTRADO AÑO 2021		
MES	LINEA 1	LINEA 2
Julio	86.81%	99.24%
Agosto	91.31%	89.50%
Septiembre	90.46%	89.54%

Fuente: Elaboración propia

**Figura 12**

Disponibilidad bombas concentrado año 2021



Nota. Disponibilidad de las bombas de concentrado de cada línea de producción año 2021

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la figura 12, la disponibilidad de las bombas de concentrado de hierro en el año 2021 en las líneas de producción es en la mayoría de casos menos a un 95% que es el estándar al que se apunta como meta en la nueva Planta Beneficio

### 5.3. ELABORACION DEL AMEF

Para la elaboración del análisis modal de efectos y fallas se realizó el reconocimiento de los ítems mantenibles en la bomba centrífuga de concentrado de hierro, tal como se muestra a continuación en la tabla 7.

**Tabla 14**

*División del Sistema de Bomba Centrífuga*

EQUIPO	
BOMBA CENTRIFUGA	
Ítems Mantenibles	Eje
	Rodamiento
	Sello aislador de rodamientos
	Impulsor
	Plato lado succión
	Plato lado descarga
	Voluta
	Acoplamiento
	Fajas de transmisión

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.3.1. BOMBA CENTRÍFUGA DE CONCENTRADO

El proceso en la Planta Filtros, comienza con el bombeo del mineral desde el área de Molienda hacia el espesador de concentrado, luego mediante las bombas de underflow son ingresadas a los filtros mediante unos distribuidores de carga.

Una vez transferido el concentrado de mineral a los filtros, empieza el proceso de generación de vacío, donde se succiona la humedad del mineral, finalmente el mineral con un porcentaje de 8% a 10% de agua, es transportado mediante fajas al stock de concentrado de Hierro.

En el proceso de generación de vacío, el agua que es succionada se va a un sumidero, donde las bombas de líquido filtrado envían nuevamente el concentrado de mineral al espesador de concentrado.

### **Contexto operativo**

El sistema de bombeo de concentrado de mineral de la Planta filtros está conformado por bombas centrifugas de 300x400 y 350x400.

Su función primaria es succionar es succionar el concentrado de mineral y transportarlo a los filtros y espesadores de concentrado, para que sigan el proceso final y de esta forma obtener el productor final de la planta concentradora.

### **Voluta**

La voluta es un componente cuya función es soportar los esfuerzos impuestos por la presión del líquido impulsado por la bomba, esfuerzos por temperatura y mecánicos. Es en este componente donde se realiza el mayor intercambio de energía cinética a energía de presión.

### **Impulsor**

El impulsor es un componente que tiene la función de transferir energía al fluido, incrementando su velocidad y presión a través de la energía mecánica transferida por un elemento conductor, en este caso un motor eléctrico.

Este componente se encarga de succionar el fluido creando una diferencia de presión al interior de la voluta y permitiendo impulsar el fluido aumentando su presión a un caudal especificado. Su diseño es cerrado para mejorar la eficiencia hidráulica. Es fabricado de acero al carbono con aleaciones que le brindan gran resistencia a la corrosión y abrasión como el cromo y manganeso.

### **Plato lado succión y lado descarga.**

Estos componentes tienen como función evitar el desgaste acelerado entre las distintas partes del impulsor y la voluta, producto de las holguras muy reducidas existentes entre ellas.

Cuando se desgastan y la separación diametral entre los anillos de desgaste del impulsor y el anillo de desgaste de la voluta es mayor al especificado por el manual, los anillos de desgaste del impulsor deben ser reemplazados sin necesidad de reparar o fabricar un nuevo impulsor.

Así mismo, los anillos de desgaste evitan las fugas hidráulicas y recirculaciones lo cual disminuye la eficiencia hidráulica de la bomba.

### **Rodamiento radial y axial**

Su función principal es soportar las cargas radiales y axiales existentes en la bomba y permitir el giro del eje con la mínima fricción posible. Los rodamientos se lubrican mediante el aceite dentro de la caja de rodamientos.

## **Eje**

Este componente tiene como función transmitir la potencia mecánica e impartirle energía al fluido incrementando su energía hidráulica a través del impulsor montado sobre este. Debe estar correctamente balanceado para trabajar adecuadamente junto a los rodamientos.

## **Retenes de aceite**

Su función principal es evitar que el aceite de lubricación de los rodamientos se filtre hacia el exterior de la caja de rodamientos y además evitar el ingreso de contaminantes hacia el interior de la caja de rodamientos.

### **5.3.2. Determinación del análisis modal de efectos y fallos**

De acuerdo con Reyes y Ocampo (1996), previamente a la realización del análisis modal de fallos y efectos (AMFE), se despliegan los criterios para obtener el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) de efectos y fallos detectados durante el funcionamiento de los equipos.

Identificar Sistemas de controles existentes

En esta etapa se identificará los controles o componentes que se diseñan para prevenir causas de fallos directos o indirectos, además de detectar el Modo de Fallo correspondiente a la observación sistemática.

Esta información debe obtenerse de analizar la criticidad del sistema y control de procesos, parecidos al objeto de estudio.

Índices de evaluación para cada modo de fallo

Existen 3 evaluaciones:

- Índice de Gravedad (G)
- Índice de Ocurrencia (O)
- Índice de Detección (D)

### **Índice de Gravedad**

Realiza la evaluación de la dificultad o riesgos del efecto o consecuencia de que aparezca una falla del equipo para el cierre o funcionamiento.

El análisis se realizará en una escala numérica del 1 al 10 de acuerdo con una tabla de gravedad de la ficha de observación y que es una función de más a menos satisfacción del usuario por la disminución de las funciones o las prestaciones.

Las causas analizadas se identifican por las potencialidades relativas a un mismo efecto que se valora a través del mismo índice de gravedad. Cuando una misma causa contribuye a provocar varios efectos diferentes del mismo modo de fallo de varios componentes, se le asignará el índice de gravedad mayor.

### **Índice de Ocurrencia (O)**

Se utiliza para la evaluación de la probabilidad de producirse el modo de fallo por cada una de las causas potenciales en una escala numeral del 1 al 10 de acuerdo a una tabla de ocurrencia.

Para su valoración, se utilizan todos los controles utilizados

actualmente para la prevención de la causa potencial del fallo.

### **Índice de Detección**

Se ocupa de evaluar para cada una de las causas, la probabilidad de detestación de esta y el modo de fallo que resulta antes de llegar al cliente en una escala del 1 al 10 de acuerdo con una tabla de detección.

Para obtener el índice de detección se supondrá que la causa de falla de lo ocurrido y se evaluará la capacidad de los controles actuales para detectar la misma o el modo de fallo resultante.

Los tres índices anteriores mencionados son independientes y para que sean homogéneas las evaluaciones, estas se realizarán por el mismo equipo de análisis

$$\mathbf{NPR = G \times O \times D = NPR \text{ (Numero de Prioridad de Riesgo)}}$$

**Tabla 15***Índice de detección de fallos*

Gravedad	
Descripción	Puntaje
Ínfima, imperceptible	1
Escasa, falla menor	2-3
Bajo, falla inminente	4-5
Media, falló, pero no detiene el sistema	6-7
Elevada, falla crítica	8-9
Muy elevada, con problemas de seguridad, no conformidad	10
Ocurrencia	
Descripción	Puntaje
1 falla en más de 2 años	1
1 falla cada 2 años	2-3
1 falla cada 1 año	4-5
1 falla entre 6 meses y un año	6-7
1 falla entre 1 a 6 meses	8-9
1 falla al mes	10
Detección	
Descripción	Puntaje
Obvia	1
Escasa	2-3
Moderada	4-5
Frecuente	6-7
Elevada	8-9
Muy elevada	10

*Nota.* Tabla de detección de fallos, se considera gravedad, ocurrencia y detección en una escala del 1 al 10.

**Fuente:** Reyes y Ocampo (1996)

**Tabla 16***Puntajes NPR numero de prioridades de riesgo modal de fallos y efectos (AMFE)*

NPR	
NPR>200	INACEPTABLE
200>NPR>125	REDUCCION DESEABLE
NPR>125	ACEPTABLE

### **5.3.3. Elaboración de AMEF y evaluación del NPR**

Después de haber realizado el reconocimiento de los ítems mantenibles dentro del sistema de Bomba de Concentrado mostrada en la tabla 14, se muestra respectivamente el AMEF del sistema: bomba centrífuga. Así mismo, a partir de la elaboración del AMEF, se realizó la evaluación del NPR de cada componente con la finalidad de identificar el componente con más riesgo dentro del sistema.

#### **Evaluación de números de prioridad de riesgo (NPR)**

El análisis de modos y efectos de fallas permitió describir los modos de fallas más comunes de cada componente de acuerdo al sistema al que pertenecen. Adicionalmente, en cada AMEF se evaluó el número de prioridad de riesgo (NPR) de cada modo de falla de acuerdo a 3 criterios: gravedad, ocurrencia y detección. A continuación, se muestra un resumen de los NPR por cada subsistema (ver tablas 17, 18 y 19).

**Tabla 17***Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) en número de prioridades de riesgo NPR*

COMPONENTE	MODO DE FALLA	G	O	D	NPR	Escala
Eje	Deflexión mayor al permitido	9	1	8	72	Aceptable
	Desgaste de bocinas de sacrificio	4	4	4	64	Aceptable
	Soltura de tuerca de ajuste	8	1	9	72	Aceptable
Rodamiento	Rayaduras en las pistas	5	3	7	105	Aceptable
	Incremento de temperatura	4	4	5	80	Aceptable
	Presencia de fatiga superficial	4	3	6	72	Aceptable
Sello aislador de rodamientos (Reten)	Ingreso de contaminantes al cilindro porta rodamientos.	5	2	4	40	Aceptable
	Fuga de aceite	4	4	3	48	Aceptable
Impulsor	Desgaste de alabes	5	8	6	240	Inaceptable
	Soltura del impulsor	8	1	3	24	Aceptable
	Atasco con objetos extraños	5	8	3	120	Reducción deseable
Plato lado succión	Desgaste superficial	5	8	7	280	Inaceptable
	Fisura o rotura	8	3	5	120	Reducción deseable
Plato lado descarga	Desgaste superficial	5	8	7	280	Inaceptable
	Fisura o rotura de la superficie	8	3	5	120	Reducción deseable
Voluta	Corrosión superficial	5	8	6	240	Inaceptable
	Erosión superficial	5	8	6	240	Inaceptable
	Fisura o rotura de la superficie	8	2	4	64	Aceptable
Acoplamiento flexible	Rotura del acoplamiento	9	1	2	18	Aceptable
Fajas de transmisión	Mayor elongamiento al permisible	5	8	2	80	Aceptable
	Rotura de faja	8	8	1	64	Aceptable

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 18***Índice modal efectos y fallos sistema de bombeado de concentrados de hierro (2021)*

Equipo: Bomba centrífuga de líquido filtrado		Análisis de Modo y Efecto de Falla				Elaborado por: Miguel Poccomucha			
Tag del equipo: 217-029						Fecha:			
Sistema: Sistema de bombeo de concentrado de hierro		Modo de Fallo Funcional	Efectos Potenciales de Fallo	Causa Potencial de Fallo	Controles Actuales	G	O	D	NPR
Eje	Transmitir el movimiento rotacional al impulsor.	Deflexión mayor al permitido	Vibración excesiva. Desgaste de rodamientos. Mayor consumo de Potencia.	Desbalance del impulsor.	Monitoreo de vibración	9	1	8	72
		Desgaste de bocinas de sacrificio	Fuga de aceite.	Fricción entre bocina y reten.	Inspección visual en campo	4	4	4	64
		Soltura de tuerca de ajuste	Soltura de rodamiento.	Mal montaje.	Ninguna	8	1	9	72
Rodamiento	Soportar cargas axiales y radiales existentes en la bomba.	Rayaduras en las pistas	Mayor fricción entre eje y rodamiento.	Ingreso de contaminantes. Sobrecarga. Mal montaje. Desalineamiento.	Monitoreo de vibración	5	3	7	105
		Incremento de temperatura	Desgaste de pistas de rodamiento.	Inadecuada lubricación.	Monitoreo de temperatura.	4	4	5	80
		Presencia de fatiga superficial	Cargas axiales y radiales excesivas	Cavitación	Monitoreo	4	3	6	72
Retenes	Evitar que el aceite del cilindro porta rodamientos se filtre al exterior evitar que contaminantes externos ingresen a la caja.	Ingreso de contaminantes.	Desgaste de rodamientos.	Temperatura elevada desgasta reten.	Monitoreo	5	2	4	40
		Fuga de aceite	Desgaste de rodamientos.	Mal montaje. Temperatura elevada.	Monitoreo	4	4	3	48
Impulsor	Impartir energía al fluido e impulsarlo al exterior de la bomba.	Desgaste de alabes	Menor presión ofrecida. Perdida de eficiencia.	Mineral abrasivo. Cavitación	Monitoreo de condiciones	5	8	6	240
		Soltura del impulsor	Vibración excesiva. Trabamiento del eje. Fricción entre impulsor y platos.	Mal montaje. Desgaste del eje roscado.	Monitoreo de condiciones	8	1	3	24
		Atasco con objetos extraños	Bajo caudal. Perdida de eficiencia. Vibración excesiva.	Ingreso de objetos extraños a los sumideros. Mineral de mayor granulometría.	Ninguna	5	8	3	120

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 19**

*Índice modal efectos y fallos sistema de bombeado de concentrados de hierro (2021)*

Equipo: Bomba centrífuga de líquido filtrado		Análisis de Modo y Efecto de Falla					Elaborado por: Miguel Poccomucha				
Tag del equipo: 217-029							Fecha:				
Sistema: Sistema de bombeo de concentrado de hierro											
Componente	Función	Modo de Fallo Funcional	Efectos Potenciales de Fallo	Causa Potencial de Fallo	Controles Actuales	G	O	D	NPR		
Plato lado succión	Generar presión para impulsar el fluido.	Desgaste superficial	Menor presión ofrecida. Perdida de eficiencia. Fuga de carga por la carcasa.	Mineral abrasivo.	Monitoreo de condiciones	5	8	7	280		
		Fisura o rotura	Fuga de carga.	Cavitación.	Monitoreo de condiciones	8	3	5	120		
Plato lado descarga	Generar presión para impulsar el fluido.	Desgaste superficial	Menor presión ofrecida. Perdida de eficiencia. Fuga de carga por la carcasa.	Mineral abrasivo.	Monitoreo de condiciones	5	8	7	280		
		Fisura o rotura	Fuga de carga.	Cavitación.	Monitoreo de condiciones	8	3	5	120		
Voluta	Soportar los esfuerzos generados por la presión del fluido bombeado.	Corrosión superficial	Perdida de eficiencia	Acido usado en el proceso del concentrado.	Monitoreo de condiciones	5	8	6	240		
		Erosión superficial	Desgaste acelerado	Mineral abrasivo.	Monitoreo de condiciones	5	8	6	240		
		Fisura o rotura de la superficie	Fuga de carga.	Desgaste excesivo Mal montaje.	Monitoreo de condiciones	8	2	4	64		
Acoplamiento flexible	Transmitir potencia del motor hacia el eje de la bomba.	Rotura del acoplamiento	Vibración excesiva.	Desalineamiento	Monitoreo de condiciones	9	1	2	18		
Fajas de transmisión	Transferir el movimiento del motor hacia el eje de la bomba.	Mayor elongamiento al permisible	Perdida de eficiencia en la transmisión Mayor consumo de corriente.	Mal alineamiento de poleas.	Monitoreo de condiciones	5	8	2	80		
		Rotura de faja	Perdida de transmisión.	Mal alineamiento de poleas.	Monitoreo de condiciones	8	8	1	64		

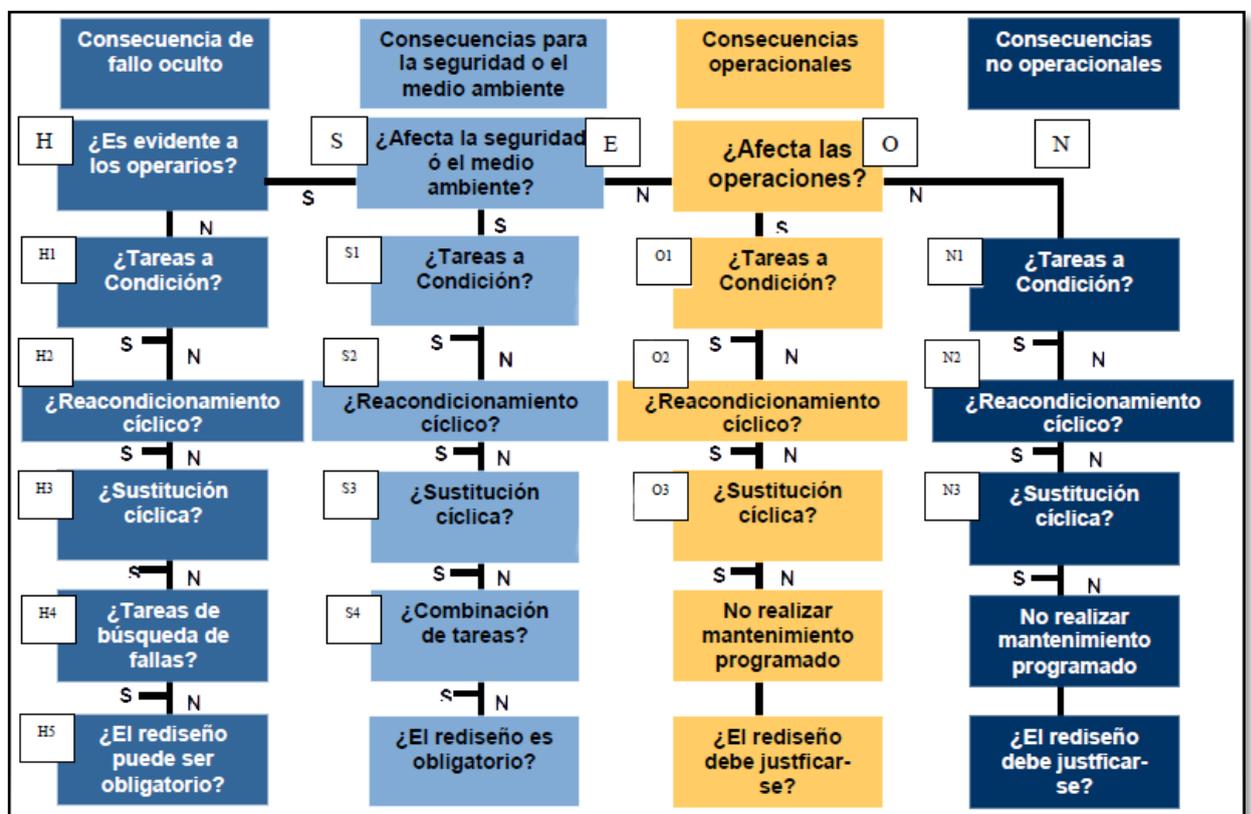
**Fuente:** *Elaboración propia*

### 5.3.4 Diagrama de decisiones

Después de replantearse el análisis de las partes críticas del sistema, se elaborará el árbol lógico de decisiones de mantenimiento respectivas según el RCM:

**Figura 13**

*Árbol lógico de decisiones de las actividades de mantenimiento*



*Nota. Árbol lógico de decisiones para determinar las tareas de mantenimiento a implementar*

**Fuente:** Moubray (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)*.

### **5.3.5 Planilla de información RCM**

Previamente al desarrollo de la hoja de decisiones estratificamos la referencia de información para poder establecer las tareas propuestas mediante las planillas de información. Estas se obtienen del desdoblamiento de las causas y modos de falla obtenidos en el AMEF.

A continuación, se muestran en las tablas 20 y 21 el análisis modal de fallas y efectos de los componentes de la bomba de concentrado, donde se constata la función de cada componente y los modos de falla de los mismos. Dichos datos nos servirán para poder elaborar las planillas de información.

Luego, en las tablas 22, 23, 24 y 25 se muestra el desarrollo de la planilla de Información de los componentes críticos de la bomba de concentrado (impulsor, voluta, plato de succión y plato de descarga) según el análisis de modo y efecto de fallas (tabla 18 y 19).

**Tabla 20***Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) por componentes*

COMPONENTE	CODIGO	FUNCIÓN
Eje	1.A	Transmitir el movimiento rotacional al impulsor.
Rodamiento	2.A	Soportar cargas axiales y radiales existentes en la bomba.
Sello aislador de rodamientos (Reten)	3.A	Evitar que el aceite del cilindro porta rodamientos se filtre al exterior, también evitar que contaminantes externos ingresen a la caja.
Impulsor	4.A	Impartir energía al fluido e impulsarlo al exterior de la bomba
Plato lado succión	5.A	Evitar el desgaste superficial de la carcasa, generar presión para impulsar el fluido.
Plato lado descarga	6.A	Evitar el desgaste superficial de la carcasa, generar presión para impulsar el fluido.
Voluta	7.A	Soportar los esfuerzos generados por la presión del fluido bombeado.
Acoplamiento flexible	8.A	Transmitir potencia del motor hacia el eje de la bomba
Fajas de transmisión	9.A	Transferir el movimiento del motor hacia el eje de la bomba

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 21***Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) por modo de falla*

CODIGO	NÚMERO	MODO DE FALLA
1.A	1	Deflexión mayor al permitido
1.A	2	Desgaste de bocinas de sacrificio
1.A	3	Soltura de tuerca de ajuste
2.A	1	Rayaduras en las pistas
2.A	2	Incremento de temperatura
2.A	3	Presencia de fatiga superficial
3.A	1	Ingreso de contaminantes al cilindro porta rodamientos.
3.A	2	Fuga de aceite
4.A	1	Desgaste de alabes
4.A	2	Soltura del impulsor
4.A	3	Atasco con objetos extraños
5.A	1	Desgaste superficial
5.A	2	Fisura o rotura
6.A	1	Desgaste superficial
6.A	2	Fisura o rotura de la superficie
7.A	1	Corrosión superficial
7.A	2	Erosión superficial
7.A	3	Fisura o rotura de la superficie
8.A	1	Rotura del acoplamiento
9.A	1	Mayor alargamiento al permisible
9.A	2	Rotura de faja

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 22**

*Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente impulsor*

Planilla de Información RCM			Componente:		Sistema: Bomba de Concentrado		
			Impulsor		Código de equipo: 217 Fecha: 2021		
Función		Falla funcional		Modo de falla	Efecto de falla	Consecuencia de falla	
1	Impartir energía al fluido e impulsarlo al exterior de la bomba.	A	Dejar de impulsar el fluido	1	Desgaste de alabes	Se tiene una menor eficiencia de bombeo, que se ve reflejado en el flujómetro (medidor de caudal) que se tiene en la línea de descarga de la bomba.	Se observa una menor presión de bombeo, así mismo se eleva con mayor rapidez la altura del sumidero de la bomba, de no llegar a controlar ocasiona derrames.
				2	Soltura del impulsor	Fricción entre plato e impulsor, ocasionando fractura las mismas y también trabamiento del eje.	Se observa una vibración excesiva en la voluta de la bomba,
				3	Atasco con objetos extraños	Perdida de la eficiencia de bombeo, el contacto de los alabes con el objeto ocasiona mayor desgaste o fractura del impulsor.	Vibración excesiva en la descarga de la bomba, menor descarga de flujo.

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 23**

*Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente voluta*

Planilla de Información RCM		Falla funcional		Componente:		Sistema: Bomba de Concentrado	
				Voluta		Código de equipo: 217	
Función				Modo de falla		Efecto de falla	Consecuencia de falla
2	Soportar los esfuerzos generados por la presión del fluido bombeado.	A	No soportar la presión generada en la bomba	1	Corrosión superficial	Debilitamiento de la superficie.	Fuga de carga por la fisura de la voluta hacia el ambiente.
				2	Erosión superficial	Disminución de la eficiencia de bombeo.	Menor descarga de flujo.
				3	Fisura o rotura de la superficie	Desgaste de la superficie.	Fuga de carga por la fisura de la voluta hacia el ambiente.

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 24**

*Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente Plato lado succión*

Planilla de Información RCM			Componente:		Sistema: Bomba de Concentrado		
			Plato Lado Succión		Código de equipo: 217		
					Fecha: 2021		
Función		Falla funcional		Modo de falla		Efecto de falla	Consecuencia de falla
3	Generar presión para impulsar el fluido.	A	Dejar de generar presión	1	Desgaste superficial	Disminución de la eficiencia de bombeo.	Menor llegada de carga en la descarga.
				2	Fisura o rotura	Perforación en el plato.	Fuga de carga por la fisura hacia el ambiente.

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 25**

*Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente Plato lado descarga*

Planilla de Información RCM			Componente:		Sistema: Bomba de Concentrado		
			Plato Lado Descarga		Código de equipo: 217		
					Fecha: 2021		
Función		Falla funcional		Modo de falla		Efecto de falla	Consecuencia de falla
4	Generar presión para impulsar el fluido.	A	Dejar de generar presión	1	Desgaste superficial	Disminución de la eficiencia de bombeo.	Menor llegada de carga en la descarga.
				2	Fisura o rotura	Perforación en el plato.	Fuga de carga por la fisura hacia el ambiente.

**Fuente:** *Elaboración propia*

Ejemplo de estratificación:

Componente: Impulsor.

La función (F) que desempeña se define como 1, está asociado a la falla funcional (FF) Dejar de impulsar el fluido la cual se define como A, y finalmente el modo o causa de falla (FM) Desgaste de alabes se define como 1. Como resultado el código obtenido de la estratificación del modo de fallo “desgaste de alabes” asociado al a la falla funcional “dejar de impulsar el fluido” al respecto de la función “Impartir energía al fluido e impulsarlo al exterior de la bomba.” del componente “Impulsor” es el 1A1.

### 5.3.6 Hoja de decisión

Es en esta etapa del análisis en la cual finalmente se integran las consecuencias y las tareas. Es en esta etapa en la que podremos responder a las últimas 3 preguntas de la metodología del RCM:

- ¿Qué importa si falla?
- ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse en caso de no encontrar una tarea proactivamente apropiada?

El uso de la hoja de decisiones permite dar respuesta a las preguntas formuladas en el árbol de decisiones, y en base a dichas respuestas registrar lo siguiente:

- Los mantenimientos de rutina que se van a efectuar, la frecuencia y el responsable de la ejecución.
- Las fallas más severas que justifican el rediseño; estas tareas serán derivadas al personal de Ingeniería de Mantenimiento para su aprobación, ejecución y control.
- Decidir en la aplicación del Run-to fail (correr a la falla).

La hoja de decisión está dividida en 16 columnas. Las primeras tres columnas F, FF, y FM identifican el modo de falla que se analizan es esa línea. Se utilizan para correlacionar las referencias de las Hojas de información y las Hojas de decisión. Los encabezamientos de las siguientes diez columnas se refieren a las preguntas del árbol de decisiones (ver figura 12), de manera que:

- Las columnas tituladas H, S, E, O y N son utilizadas para registrar las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de los modos de falla, colocando S o N (Sí o No según aplique)
- Las tres columnas siguientes (tituladas H1, H2, H3, etc.) registran si ha sido seleccionada una tarea proactiva, y si es así, que tipo de tarea.
- Si se hace necesario responder a cualquiera de las preguntas “a falta de “, las columnas H4, H5 y S4 son las que permiten registrar esas

respuestas, colocando S o N (Sí o No según aplique)

- Las últimas tres columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia en la que debe hacerse, y quién ha sido seleccionado para realizarla.
- La columna de tarea propuesta también se utiliza para colocar actividades de “rediseño”, o si se decidió que el modo de fallo sea tratado Run-to fail [MOUBRAY, 2004].

El desarrollo de las Hojas de Información y de las Hoja de Decisiones será presentado en las tablas 26, 27 y 28 como parte de los resultados obtenidos.

Leyenda:

F: Función

FF: Falla funcional

FM: Modo de falla

H: Consecuencias de fallas ocultas

S: Consecuencias a la seguridad

E: Consecuencias al medio ambiente

O: Consecuencias operativas

H1 S1 O1 N1: Tareas basadas en condición

H2 S2 O2 N2: Tareas de reacondicionamiento cíclico

H3 S3 O3 N3: Tareas de sustitución cíclica

H4: Búsqueda de fallas

H5: Rediseño

S4: Combinación de tareas

**Tabla 26**

*Análisis RCM (reliability-centered Maintenance) o mantenimiento centrado en la confiabilidad, tarea propuesta de implementación.*

Planilla de decisión RCM										Componente						Sistema: Bomba de Concentrado	
										Tarea Propuesta						Intervalo Inicial	Puede ser realizado por
Referencia de información			Evaluación de Consecuencias				H1 S1 E1 N1	H2 S2 E2 N2	H3 S3 E3 N3	Acción a falta de							
F	FF	FM	H	S	E	O			H4	H5	S4						
<b>Impulsor</b>																	
1	A	1	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	Monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje).	Diario	Operador / Sala de control		
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Cambio de impulsor.	2500 horas	Mecánicos		
		2	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de Vibración y Temperatura.	Interdiario	Mecánicos		
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Verificar el correcto ajuste del impulsor.	Durante el ensamblado	Mecánicos		
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje).	Diario	Operador / Sala de control		
		3	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de vibración y temperatura.	Interdiario	Mecánicos		
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje).	Diario	Operador / Sala de control		
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Diseñar e instalar canastilla en la succión de la bomba para evitar ingreso de objetos extraños.	Permanente	Área de Ingeniería		

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 27**

*Análisis RCM (reliability-centered Maintenance) o mantenimiento centrado en la confiabilidad, tarea propuesta de implementación.*

Planilla de decisión RCM							Componente						Sistema: Bomba de Concentrado			
							Acción a falta de						Tarea Propuesta		Intervalo Inicial	
Referencia de información			Evaluación de Consecuencias				H1 S1 E1 N1	H2 S2 E2 N2	H3 S3 E3 N3	H4	H5	S4	Código de equipo: 217		Fecha: 2021	
F	FF	FM	H	S	E	O										
<b>Voluta</b>																
2	A	1	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Cambio de voluta	4000 horas	Mecánicos	
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje).	Diario	Operador / Sala de control	
	A	2	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de parámetros de operación y niveles de sumidero de la bomba	Diario	Operaciones	
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Inspección de estado de las baldosas del sumidero.	3 meses	Operaciones	
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Limpieza del sumidero (mineral asentado)	4 meses	Operaciones	
	A	3	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Verificar el correcto montaje	Durante el ensamblado	Mecánicos	
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Cambio de voluta	4000 horas	Mecánicos	

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 28**

*Análisis RCM (reliability-centered Maintenance) o mantenimiento centrado en la confiabilidad, tarea propuesta de implementación.*

Planilla de decisión RCM							Componente						Sistema: Bomba de Concentrado		
							Tarea Propuesta						Intervalo Inicial	Puede ser realizado por	
Referencia de información			Evaluación de Consecuencias				H1 S1 E1 N1	H2 S2 E2 N2	H3 S3 E3 N3	Acción a falta de					
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
<b>Plato lado succión</b>															
3	A	1	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje).	Diario	Operador / Sala de control
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Mejorar material de fabricación de repuesto.	Permanente	Área de Ingeniería
	A	2	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de vibración y temperatura.	Semanal	Mecánicos
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Cambio de plato.	2500 horas	Mecánicos
<b>Plato lado descarga</b>															
4	A	1	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje).	Diario	Operador / Sala de control
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Mejorar material de fabricación de repuesto.	Permanente	Área de Ingeniería
	A	2	N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Monitoreo de vibración y temperatura.	Semanal	Mecánicos
			N	N	N	S	N	N	S	N	N	N	Cambio de plato.	2500 horas	Mecánicos

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 29**

2do. Análisis modal de fallos y efectos (AMFE) en número de prioridades de riesgo NPR

COMPONENTE	MODO DE FALLA	G	O	D	NPR	Escala
Eje	Deflexión mayor al permitido	9	1	8	<b>72</b>	<b>Aceptable</b>
	Desgaste de bocinas de sacrificio	4	4	4	<b>64</b>	<b>Aceptable</b>
	Soltura de tuerca de ajuste	8	1	9	<b>72</b>	<b>Aceptable</b>
Rodamiento	Rayaduras en las pistas	4	3	4	<b>48</b>	<b>Aceptable</b>
	Incremento de temperatura	4	4	5	<b>80</b>	<b>Aceptable</b>
	Presencia de fatiga superficial	4	3	6	<b>72</b>	<b>Aceptable</b>
Sello aislador de rodamientos (Reten)	Ingreso de contaminantes al cilindro porta rodamientos.	5	2	4	<b>40</b>	<b>Aceptable</b>
	Fuga de aceite	4	4	3	<b>48</b>	<b>Aceptable</b>
Impulsor	Desgaste de alabes	4	4	4	<b>64</b>	<b>Aceptable</b>
	Soltura del impulsor	8	1	3	<b>24</b>	<b>Aceptable</b>
	Atasco con objetos extraños	4	4	4	<b>64</b>	<b>Aceptable</b>
Plato lado succión	Desgaste superficial	4	3	4	<b>48</b>	<b>Aceptable</b>
	Fisura o rotura	4	4	4	<b>64</b>	<b>Aceptable</b>
Plato lado descarga	Desgaste superficial	4	4	5	<b>80</b>	<b>Aceptable</b>
	Fisura o rotura de la superficie	4	4	4	<b>64</b>	<b>Aceptable</b>
Voluta	Corrosión superficial	5	4	4	<b>80</b>	<b>Aceptable</b>
	Erosión superficial	4	3	6	<b>72</b>	<b>Aceptable</b>
	Fisura o rotura de la superficie	8	2	4	<b>64</b>	<b>Aceptable</b>
Acoplamiento flexible	Rotura del acoplamiento	9	1	2	<b>18</b>	<b>Aceptable</b>
Fajas de transmisión	Mayor alongamiento al permisible	5	8	2	<b>80</b>	<b>Aceptable</b>
	Rotura de faja	8	8	1	<b>64</b>	<b>Aceptable</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Tabla 30

2do. Índice modal efectos y fallos sistema de bombeado de concentrados de hierro

Equipo: Bomba centrífuga de líquido filtrado		Análisis de Modo y Efecto de Falla				Elaborado por: Miguel Poccomucha				
Tag del equipo: 217						Fecha: Junio 2021				
Sistema: Sistema de bombeo de concentrado de hierro		Modo de Falla	Efectos Potenciales de Fallo	Causa Potencial de Fallo	Controles Actuales	G	O	D	NPR	
Eje	Transmitir el movimiento rotacional al impulsor.	Deflexión mayor al permitido	Vibración excesiva. Desgaste de rodamientos. Mayor consumo de Potencia.	Desbalance del impulsor.	Monitoreo de vibración	9	1	8	72	
		Desgaste de bocinas de salida	Fuga de aceite.	Fricción entre bocina y reten.	Inspección visual en cámara	4	4	4	64	
		Soltura de tuerca de ajuste	Soltura de rodamiento.	Mal montaje.	Monitoreo de ajuste	8	1	9	72	
Rodamiento	Soportar cargas axiales y radiales existentes en la bomba.	Rayaduras en las pistas	Mayor fricción entre eje y rodamiento.	Ingreso de contaminantes. Sobrecarga. Mal montaje. Desalineamiento.	Monitoreo de vibración	4	3	4	48	
		Incremento de temperatura	Desgaste de pistas de rodamiento.	Inadecuada lubricación.	Monitoreo de temperatura	4	4	5	80	
		Presencia de fatiga superficial	Cargas axiales y radiales excesivas.	Cavitación	Monitoreo de cavitación	4	3	6	72	
Retenes	Evitar que el aceite de la cámara porta rodamientos se filtre al exterior evitar que contaminantes entren a la cámara	Ingreso de contaminantes.	Desgaste de rodamientos.	Temperatura elevada desbalance	Control de temperatura	5	2	4	40	
		Fuga de aceite	Desgaste de rodamientos.	Mal montaje. Temperatura elevada.	Control de temperatura	4	4	3	48	
Impulsor	Impartir energía al fluido e impulsarlo al exterior de la bomba.	Desgaste de alabes	Menor presión ofrecida. Pérdida de eficiencia.	Mineral abrasivo. Cavitación	Monitoreo de desgaste de alabes	4	4	4	64	
		Soltura del impulsor	Vibración excesiva. Trabamiento del eje. Fricción entre impulsor y platos.	Mal montaje. Desgaste del eje roscado.	Control de desgaste	8	1	3	24	
		Atasco con objetos extraños	Bajo caudal. Pérdida de eficiencia. Vibración excesiva.	Ingreso de objetos extraños a los sumideros. Mineral de mayor granulometría.	Control y monitoreo de atasco	4	4	4	64	
Plato lado succión	Generar presión para impulsar el fluido.	Desgaste superficial	Menor presión ofrecida. Pérdida de eficiencia. Fuga de carga por la carcasa.	Mineral abrasivo.	Monitoreo de desgaste superficial	4	3	4	48	
		Fisura o rotura	Fuga de carga.	Cavitación.	Control de fisura y fuga	4	4	4	64	
Plato lado descarga	Generar presión para impulsar el fluido.	Desgaste superficial	Menor presión ofrecida. Pérdida de eficiencia. Fuga de carga por la carcasa.	Mineral abrasivo.	Control de desgaste	4	4	5	80	
		Fisura o rotura	Fuga de carga.	Cavitación.	Control de fisura y fuga	8	2	4	64	
Voluta	Soportar los esfuerzos generados por la presión del fluido bombeado.	Corrosión superficial	Pérdida de eficiencia	Ácido usado en el proceso	Control de pérdida de eficiencia	5	4	4	80	
		Erosión superficial	Desgaste acelerado	Mineral abrasivo.	Control de desgaste	4	3	6	72	
		Fisura o rotura de la superficie	Fuga de carga.	Desgaste excesivo Mal montaje.	Control de Fuga	8	2	4	64	
Acoplamiento flexible	Transmitir potencia del motor hacia el eje de la bomba.	Rotura del acoplamiento	Vibración excesiva.	Desalineamiento	Control de vibración	9	1	2	18	
Fajas de transmisión	Transferir el movimiento del motor hacia el eje de la bomba.	Mayor elongamiento al permisible	Pérdida de eficiencia en la transmisión Mayor consumo de corriente.	Mal alineamiento de poleas.	Control de consumo	5	8	2	80	
		Rotura de faja	Pérdida de transmisión.	Mal alineamiento de poleas.	Control de transmisión	8	8	1	64	

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el análisis RCM y aplicar las tareas recomendadas, ahora se calculará la disponibilidad de los meses de julio, agosto y septiembre del año 2022.

**Tabla 31**

*Disponibilidad en bombas de Underflow Periodo Julio 2022 (Línea 01 y 02)*

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba underflow 1001	744	0	100%
1	Bomba underflow 1002	733	11	98.52%
2	Bomba underflow 2001	744	0	100%
2	Bomba underflow 2002	736	8	98.92%

*Fuente: Elaboración propia*

La disponibilidad para cada línea en el mes de julio sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{uf1001} \times D_{uf1002} = 1 \times 0.9852 = 98.52\%$$

$$D_{ln2} = D_{uf2001} \times D_{uf2002} = 1 \times 0.9892 = 98.92\%$$

**Tabla 32**

*Disponibilidad en bombas de Overflow Periodo Julio 2022 (línea 01 y 02)*

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba overflow 1001	744	0	100%
1	Bomba overflow 1002	744	0	100%
2	Bomba overflow 2001	744	0	100%
2	Bomba overflow 2002	744	0	100%

*Fuente: Elaboración propia*

La disponibilidad para cada línea en el mes de julio sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{ov1001} \times D_{ov1002} = 1 \times 1 = 100\%$$

$$D_{ln2} = D_{ov2001} \times D_{ov2002} = 1 \times 1 = 100\%$$

**Tabla 33**

Disponibilidad en bombas de Underflow Periodo agosto 2022 (Línea 01 y 02)

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba underflow 1001	744	0	100%
1	Bomba underflow 1002	733	11	98.52%
2	Bomba underflow 2001	744	0	100%
2	Bomba underflow 2002	744	0	100%

*Fuente: Elaboración propia*

La disponibilidad para cada línea en el mes de agosto sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{uf1001} \times D_{uf1002} = 1 \times 0.9852 = 98.52\%$$

$$D_{ln2} = D_{uf2001} \times D_{uf2002} = 1 \times 1 = 100\%$$

**Tabla 34**

Disponibilidad en bombas de Overflow Periodo agosto 2022 (línea 01 y 02)

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba overflow 1001	738	6	99.19%
1	Bomba overflow 1002	744	0	100%
2	Bomba overflow 2001	744	0	100%
2	Bomba overflow 2002	744	0	100%

*Fuente: Elaboración propia*

La disponibilidad para cada línea en el mes de agosto sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{ov1001} \times D_{ov1002} = 0.9919 \times 1 = 99.19\%$$

$$D_{ln2} = D_{ov2001} \times D_{ov2002} = 1 \times 1 = 100\%$$

**Tabla 35**

Disponibilidad en bombas de Underflow Periodo septiembre 2022 (Línea 01 y 02)

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba underflow 1001	720	0	100%
1	Bomba underflow 1002	720	0	100%
2	Bomba underflow 2001	715	5	99.31%
2	Bomba underflow 2002	715	5	99.31%

*Fuente: Elaboración propia*

La disponibilidad para cada línea en el mes de septiembre sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{uf1001} \times D_{uf1002} = 1 \times 1 = 100\%$$

$$D_{ln2} = D_{uf2001} \times D_{uf2002} = 0.9931 \times 0.9931 = 98.62\%$$

**Tabla 36**

Disponibilidad en bombas de Overflow Periodo septiembre 2022 (línea 01 y 02)

Línea	Equipo	MTBF	MTTR	D(i)
1	Bomba overflow 1001	720	0	100%
1	Bomba overflow 1002	720	0	100%
2	Bomba overflow 2001	714	6	99.17%
2	Bomba overflow 2002	720	0	100%

*Fuente: Elaboración propia*

La disponibilidad para cada línea en el mes de septiembre sería igual a:

$$D_{ln1} = D_{ov1001} \times D_{ov1002} = 1 \times 1 = 100\%$$

$$D_{ln2} = D_{ov2001} \times D_{ov2002} = 0.9917 \times 1 = 99.17\%$$

**Tabla 37**

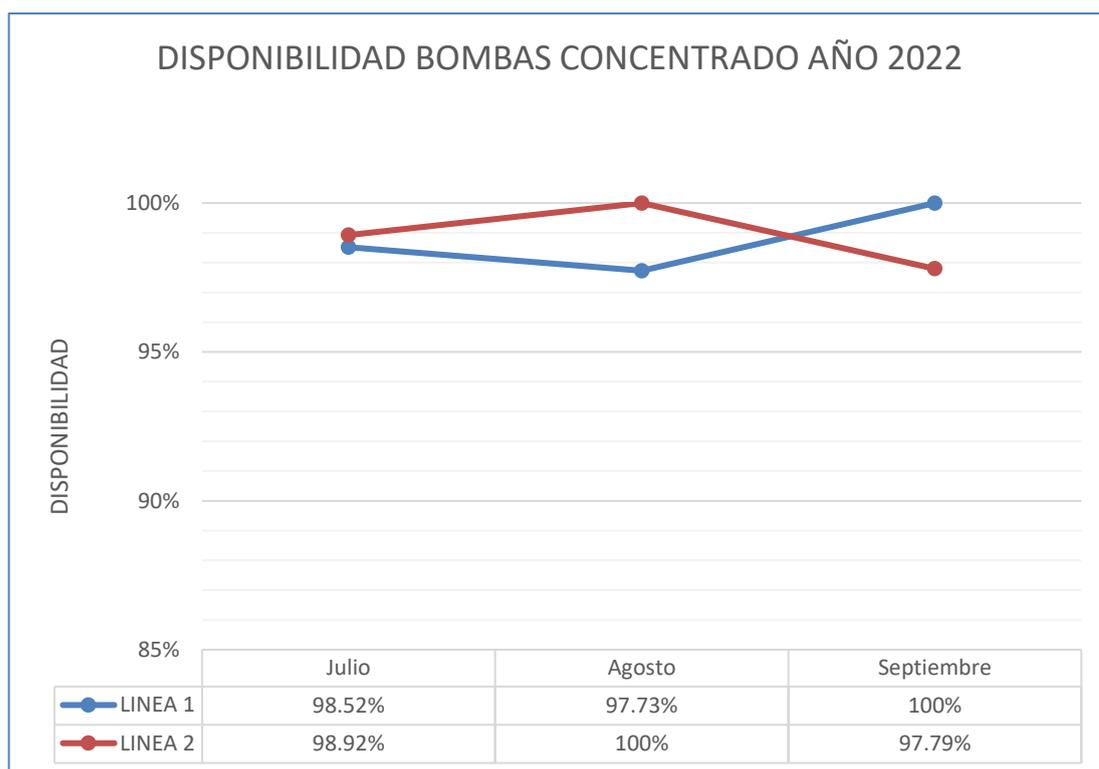
*Disponibilidad en bombas de concentrado Año 2022 (Línea 01 y 02)*

DISPONIBILIDAD BOMBA DE CONCENTRADO AÑO 2022		
MES	LINEA 1	LINEA 2
Julio	98.52%	98.92%
Agosto	97.73%	100%
Septiembre	100%	97.79%

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 14**

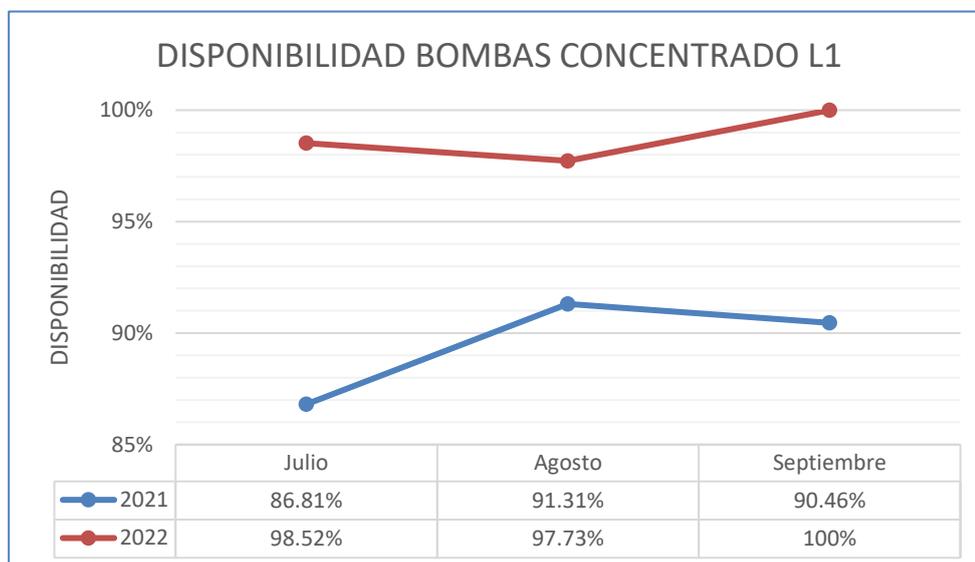
*Disponibilidad bombas concentrado año 2022*



*Nota.* Disponibilidad de las bombas de concentrado de cada línea de producción año 2022

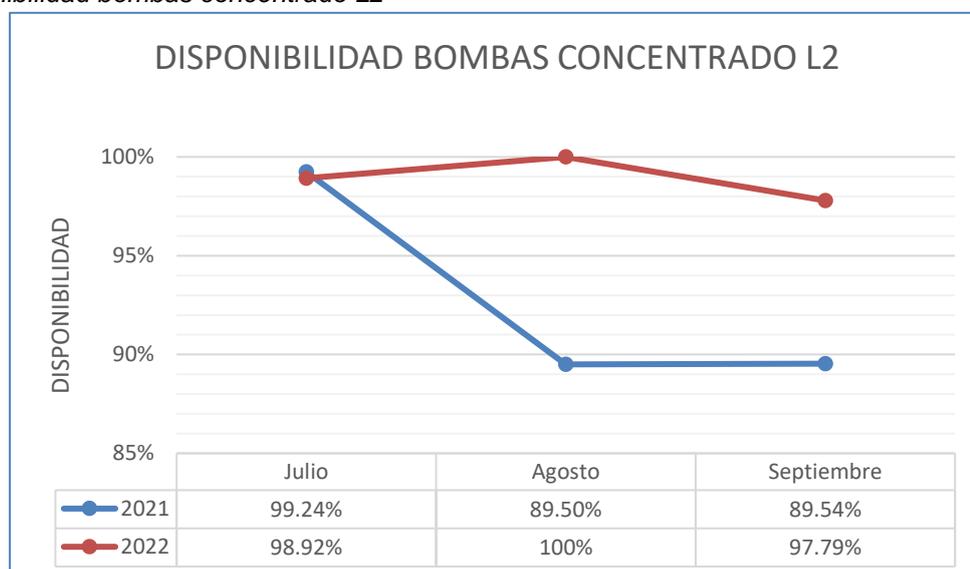
*Fuente: Elaboración propia*

Como se aprecia en la figura 14, la disponibilidad de las bombas de concentrado en el año 2022 sufrió una mejoría notable luego de aplicar las tareas recomendadas por el análisis AMFE.

**Figura 15***Disponibilidad bombas concentrado L1*

*Nota.* Comparación de la disponibilidad de los años 2021 y 2022 en la línea N°1

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 16***Disponibilidad bombas concentrado L2*

*Nota.* Comparación de la disponibilidad de los años 2021 y 2022 en la línea N°2

*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 15, se puede apreciar la comparación de las disponibilidades de las bombas de concentrado de la línea de producción N°1 en los años 2021 y 2022. En la figura 16, se puede apreciar la comparación de las disponibilidades de las bombas de concentrado de la línea de producción N°2 en los años 2021 y 2022.

## **CAPÍTULO VI – ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

De acuerdo con la tabla 17, en el análisis modal de fallos y efectos (AMFE) en cantidad de prioridades de riesgo (NPR), y de acuerdo con los parámetros de tabla de índice de detección de fallos de la bomba de concentrados, se obtuvo los siguientes resultados en el nivel inaceptable:

- a) El impulsor presenta desgaste de alabes
- b) El impulsor presenta desgaste superficial
- c) El Plato lado descarga presenta desgaste superficial
- d) La voluta presenta corrosión superficial
- e) La voluta muestra evidencia erosión superficial

Del análisis de fallos y efectos, se produjeron daños por erosión de los componentes fundamentales de la bomba, incluidos el impulsor, los sellos y la carcasa a los que se les observa cierto desgaste. Si los daños no tienen solución, se reducirá significativamente el rendimiento del equipo, a la falta de una política planificada preventiva en los equipos el desgaste de la bomba y los costosos procedimientos de reemplazo y mantenimiento serán afectados significativamente.

Del mismo modo el análisis modal de fallos y efectos (AMFE), muestra un nivel de reducción deseable en las siguientes observaciones:

- a) El impulsor se evidencia atasco con objetos extraños

b) El plato lado descarga presenta fisura de la superficie

En la tabla 18, la bomba centrífuga de líquido filtrado, en el componente Impulsor cuya función es impartir energía al fluido e impulsarlo al exterior de la bomba, presenta un modo de fallo de desgaste de alabes, donde, las prioridades de riesgo modal de fallos y efectos tiene como índice 240 en una escala de inaceptable, cuyo efecto potencia de fallo origina menor presión y pérdida de eficiencia, se detectó, que la causa de esto es el mineral Abrasivo y Cavitación del sistema. La cavitación en las bombas aparece cuando la presión de un líquido a temperatura constante se pone por debajo de su punto de presión de vapor saturado. Cuando ocurre esto la cavitación se forman burbujas de aire y colapsan en el líquido. Esto genera ruido atípico y puede provocar daños en la instalación. La cavitación en muchos casos, una ocurrencia de observaciones que podría establecer en error o fallo. En bombas centrífugas, la cavitación causa daños en las partes y componentes (erosión del material), vibraciones, ruido y pérdida de eficiencia.

Como se muestra en la tabla 19, la bomba centrífuga de líquido filtrado, en el componente Plato lodo succión, cuya función es generar presión para impulsar el fluido, se detectó en prioridades de riesgo modal de fallos y efectos con un índice de 280, los efectos potenciales de fallo se describen, menor presión, pérdida de eficiencia, fuga de carga por la carcasa, se identificó que la causa potencial de fallo es el mineral abrasivo del plato lodo succión, cuando se está bombeando líquido que ya contiene aire y este incide en el ojo del impulsor, es lo que provoca muchas veces grandes daños similares a la cavitación.

Se evidencia en la tabla 19, la bomba centrífuga de líquido filtrado, en el componente Plato lodo descarga, cuya función generar presión para impulsar el fluido, en prioridades de riesgo modal de fallos y efectos presenta un índice de 280, presentando un desgaste superficial, menor presión ofrecía, pérdida de eficiencia, las causas que origina es el mineral abrasivo de la bomba centrífuga de líquido filtrado. Los atascos en las bombas son un gran problema que se describe en la literatura de sistemas de funcionamiento en el mundo, de forma especial con las bombas centrífugas de tolerancia muy baja entre la pared de la carcasa de la bomba y el impulsor, permitiendo que sólidos muy pequeños pasen. Si las bombas encuentran sólidos más grandes que los diseñados, esta se obstruiría fácilmente, provocando pérdidas de producción y un tiempo de mantenimiento adicional para eliminar las obstrucciones.

Se muestra en la tabla 19, la bomba centrífuga de líquido filtrado, en el componente Voluta, su función fundamental es el soporte de los esfuerzos generados por la presión del fluido bombeado, se ha detectado 2 modos de prioridades de riesgo modal de fallos y efectos, una presenta un índice de 240, cuyo se evidencia en pérdida de eficiencia y se evidencia ácido usado en el proceso del concentrado, y en la segunda observación se evidencio erosión superficial con un desgaste acelerado debido a la presencia de mineral abrasivo en la bomba centrífuga. Las pulsaciones de presión son fluctuaciones básicas. Para las bombas cuya operación es continua, las pulsaciones de presión de succión y descarga pueden ocasionar inestabilidad en el control de la bomba, se precisa tomar en cuenta para el análisis de acuerdo con el contexto operativo, la vibración de las tuberías de succión y descarga y altos niveles de ruido de la bomba.

De acuerdo con la Tabla 22 Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente impulsor se identifica el modo de fallos lo siguiente:

- Desgaste de alabes, se tiene una menor eficiencia de bombeo, que se ve reflejado en el flujómetro (medidor de caudal) que se tiene en la línea de descarga de la bomba, trae como consecuencia una menor presión de bombeo, así mismo se eleva con mayor rapidez la altura del sumidero de la bomba, de no llegar a controlar ocasiona derrames.

- Soltura del impulsor, presenta un efecto de falla en la fricción entre plato e impulsor, ocasionado fractura las mismas y también trabamiento del eje, se observa una vibración excesiva en la voluta de la bomba.
- Atasco con objetos extraños, ocasionando pérdida de la eficiencia de bombeo, el contacto de los alabes con el objeto ocasiona mayor desgaste o fractura del impulsor.

Como se muestra en la Tabla 23, Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente Voluta, presenta las siguientes fallas:

- Corrosión superficial. Se presenta un debilitamiento de la superficie que tiene como consecuencia una fuga de carga por la fisura de la voluta hacia el ambiente.
- Erosión superficial. Con un efecto de falla en la disminución de la eficiencia de bombeo se produce una menor carga de flujo.
- Fisura o rotura de la superficie. Al producirse un efecto de falla en el desgaste de superficie, se ocasiona una fuga de carga por la fisura de la Voluta hacia el ambiente.

De acuerdo con la Tabla 24, evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente Plato Lado Succión, presenta las siguientes fallas:

- Desgaste superficial. Surge un efecto de falla en la disminución de la eficiencia de bombeo trayendo consigo una menor llegada de carga en la descarga.
- Fisura o rotura. Se presenta una falla de perforación en el plato

produciendo la fuga de carga por la fisura hacia el ambiente.

De acuerdo con la Tabla 25 Evaluación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en el componente Plato Lado Descarga se evidencio los siguientes modos de fallo:

- Desgaste superficial. Da como efecto la disminución de la eficiencia de bombeo que origina menor llegada de carga en la descarga.
- Fisura o rotura. Se evidencia perforación en el plato originando fuga de carga por la fisura hacia el ambiente.

De acuerdo a las Tablas 26, 27 y 28 en el análisis RCM o Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, se propone un grupo de decisiones para optimizar el Sistema de Bomba de Concentrados, logrando una adecuada eficiencia en la planificación de tareas de mantenimiento. Surge la necesidad del diseño de distintos procedimientos y formatos de estándares internacionales que ayuden a ejecutar una tarea y registrar las condiciones en las cuales quedó el equipo intervenido.

Las columnas tituladas H, S, E, O y N se refieren a las respuestas a las preguntas que tienen que ver con las consecuencias de cada modo de falla.

Las tres columnas siguientes H1, H2, H3, etc. registran tareas proactivas que han sido seleccionadas y si así fuese qué tipo de tarea.

Las respuestas a las preguntas “a falta de que” son registradas en las columnas H4, H5 y S4.

Para la Tarea Propuesta en el componente Impulsor (ver tabla 26) se propone el Monitoreo de vibración y Temperatura, monitoreo de parámetros

de operación (Flujo, presión, amperaje), diseñar e instalar canastilla en la succión de la bomba para evitar ingreso de objetos extraños, verificar el correcto ajuste del impulsor y diseñar e instalar canastilla en la succión de la bomba para evitar ingreso de objetos extraños.

Para la Tarea Propuesta en el componente Voluta (ver tabla 27) se propone cambio de voluta, monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje), monitoreo de parámetros de operación y niveles de sumidero de la bomba, inspección de estado de las baldosas del sumidero, limpieza del sumidero (mineral asentado), verificar el correcto montaje, cambio de voluta.

Para la Tarea Propuesta en el componente Plato lado succión (ver tabla 28) se propone monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje), mejorar material de fabricación de repuesto, monitoreo de vibración y temperatura y cambio de plato.

Para la Tarea Propuesta en el componente Plato lado descarga (ver tabla 28) se propone monitoreo de parámetros de operación (Flujo, presión, amperaje), mejorar material de fabricación de repuesto, monitoreo de vibración y temperatura, cambio de plato.

Después de haber realizado las tareas propuestas, se procedió a realizar el 2do. Análisis longitudinal modal de fallos y efectos (AMFE) en número de prioridades de riesgo NPR realizado en el 2021. Como muestra en la tabla 29, presenta una escala aceptable en los componentes de la Bomba de Concentrados de hierro, se evidencia que las tareas propuestas fueron tomadas en cuenta y ha optimizado el funcionamiento de la maquinaria.

Se procedió a realizar el 2do Análisis del índice modal de efectos y fallos del sistema de bombeado de concentrados de hierro en el 2022, los resultados fueron óptimos, tales como se muestra en la Tabla 30. Las tareas propuestas en primer análisis realizado en el 2021 fueron corregidas conforme a las observaciones realizadas, presentando al 2022 en una escala aceptable.

Así mismo se calcularon las disponibilidades obtenidas en algunos meses del año 2021 (ver tabla 13), antes de aplicar las tareas propuestas del análisis AMFE, y las disponibilidades del año 2022 (ver tabla 37), una vez aplicado el análisis AMFE. Al comparar las disponibilidades de algunos meses de los años 2021 y 2022 (figura 15 y figura 16), se observa una mejora en el rendimiento de los equipos, puesto que la disponibilidad tuvo un incremento notorio debido a que los equipos ya no se detenían por mantenimientos correctivos, sino se empezó a realizar mantenimientos preventivos luego de aplicar las tareas sugeridas en el análisis AMFE, lo que afirma la hipótesis del presente trabajo de investigación.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio realizado, **podemos afirmar la hipótesis de la investigación**, donde, la evaluación de la confiabilidad del sistema de bombeo de concentrado de hierro optimiza el rendimiento de los equipos de las instalaciones de la minera Shougang Hierro Perú S.A. en el distrito de Marcona, provincia de Nazca, departamento de Ica 2023.

En el análisis modal de fallos y efectos (AMFE), mantenimiento centrado en la confiabilidad, se conoció el contexto operacional, se definió la función del equipo y se generó información relevante de todas las fallas que han sido observadas y que en el futuro puedan suceder y no hayan sido tomadas en cuenta con el objetivo de lograr un análisis estricto y más completo. El análisis logra identificar aquellos indicadores que tienen que arreglarse o sustituirse para asegurar el correcto desempeño productivo de sus funciones a un componente en el contexto operacional en el sistema de bomba de concentrado de las instalaciones de la minería Shougang Hierro Perú S.A. Así mismo, al emplear el indicador de disponibilidad, se observa la optimización del rendimiento de los equipos, luego de la aplicación del análisis AMFE.

Se concluye que la relación entre la organización minería Shougang Hierro Perú S.A., y los elementos físicos del equipo de sistema de bombeo de concentrados, determinarán la operatividad de las tareas propuestas que se

encuentran descritas en el análisis modal de fallos y efectos, tomando especial relevancia la planificación, monitoreo, control y profesionalismo entre las distintas áreas implicadas, esto permitirá una adecuada asistencia técnica de mantenimiento y predicción de los equipos, permitiendo tomar en cuenta criterios técnicos, así conseguir la información detallada y precisa que establezca la función de cada componente, logrando continuidad del funcionamiento idóneo al proceso productivo.

Se concluye que el análisis modal de fallos y efectos permite una confiabilidad de la información básica que nos pueden llevar a la causa raíz de fallos y efectos del sistema de bomba concentrados, se precisa muy importante involucrar a los operadores técnicos y otras especialidades de gestión, para comprender el contexto operativo funcional del sistema y así poder identificar certeramente los modos, efectos y criticidad de los componentes que lo componen.

## RECOMENDACIONES

A través del análisis de la presente investigación, se recomienda a las diversas industrias de este rubro, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad de efectos y fallos, esto optimizará el rendimiento en los equipos de sistema bombeo de concentrado

Por otro lado, se debe implementar el Plan anual de Mantenimiento Institucional de la minera Shougang Hierro Perú S.A. esto será útil para realizar el seguimiento sistemático de los equipos operativos permitiendo controlar la compra y almacenamiento de repuestos, mantener un historial del funcionamiento de los equipos teniendo en cuenta sus intervenciones técnicas y observaciones, realizar las intervenciones en forma estandarizada y validada por expertos y/o por los técnicos, permitirá que el mantenimiento centrado en la Confiabilidad de efectos y fallos mejore la producción, reduzca pérdidas y genere sobre costos a la empresa.

Considerar la importancia de realizar el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad de efectos y fallos en los distintos sistemas de equipo de la minera Shougang Hierro Perú S.A, que determina un óptimo funcionamiento de los equipos operativos , lo que lleva a disminuir los costos de mantenimiento y energía, las industrias dedicadas a este rubro deben tomar en cuenta la capacitación profesional, el monitoreo y control del sistema de bombeo concentrado, interactuar una política de mejora continua con las distintas áreas y departamentos de mantenimiento planificado, donde se realicen operación e ingeniería para lograr los resultados esperados y atacar

los problemas desde su raíz, llevando así a tareas de mantenimiento más efectivas y condiciones de operación óptimas.

Se recomienda de aplicación obligatoria, la conformación de un equipo de trabajo calificado de profesionales antes durante y después del diseño Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad de efectos y fallos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBA. (2021). *El mantenimiento preventivo - mitos y ventajas*. Drives.  
<https://new.abb.com/drives/es/servicios/mantenimiento/mantenimiento-preventivo/el-mantenimiento-preventivo-mitos-y-ventajas>
- Aguilar, J. R., Torres, R., & Magaña, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 25(1), 15–26.  
<https://www.redalyc.org/pdf/482/48215094003.pdf>
- Álvarez Caycho R. H. (2018). Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad de los motores Caterpillar 3516 de los grupos electrógenos de una refinería de petróleo. [Tesis profesional, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional del Callao.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12952/3817>
- Casachagua Davila C.G. (2017). Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo basado en el RCM para mejorar la disponibilidad mecánica de la excavadora Cat 336 de la Empresa Ecosem Smelter S.A [Tesis profesional, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional del Centro del Perú.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/1652>
- CONTEC Ltda. (2015). *MSCP-KPI INDICADORES PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO* [Diapositivas]. Docplayer.

<https://docplayer.es/815662-Mscp-kpi-indicadores-para-la-gestion-del-mantenimiento-contec-ltda.html>

Contreras Quispe, C.A. (2016). Plan de mantenimiento de equipos de movimiento de tierra por criticidad para tener maquinas disponibles en la municipalidad provincial de Yauli La Oroya. [Tesis profesional, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional del Centro del Perú.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/1573>

Curiel Campillo R.R. & Padilla Cantillo G.A. (2010). Análisis de confiabilidad en los equipos de bombeo de agua cruda en la empresa Acuacar S.A. [Tesis profesional, Universidad Tecnológica de Bolívar]. Repositorio Universidad Tecnológica de Bolívar.  
<http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0061368.pdf>

De la Rosa Saldaña C.I. (2019). Análisis de fallas y confiabilidad de sellos mecánicos en bombas de lodos: una revisión sistemática. [Tesis profesional, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional Universidad Privada del Norte.  
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/22083?show=full>

Garcia Esparza C. D. (2015). Modelo de gestión de mantenimiento para incrementar la calidad en el servicio en el departamento de alta tensión de STC metro de la Ciudad de México [Tesis profesional de Maestría, Instituto Politécnico Nacional – México] Repositorio UPIICSA IPN .  
<http://repositorio.upiicsa.ipn.mx/handle/20.500.12271/864>

- Garcia, P. O. (2007). *Repositorio Institucional UPTC* [Diapositivas]. Repositorio Institucional Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1307>
- Gramsch, J. M. (2018, 22 noviembre). *OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN UNA SITUACIÓN DE ALTA DEMANDA*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/optimizaci%C3%B3n-de-la-gesti%C3%B3n-del-mantenimiento-en-una-gramsch-labra/?originalSubdomain=es>
- Javier Julca, R. (2013). Optimización del sistema de bombeo de la rama de profundización 7400 (-) de compañía minera San Ignacio de Morococha – Unidad de Producción San Vicente. [Tesis profesional, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio de Tesis Digitales – Cybertesis. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/12739?show=full>
- Klimasauskas, R. E. (2013). *Mantenimiento en Minería - Segunda parte*. <http://www.mantenimientomundial.com/notas/mineria2.pdf>
- Leal, S. L., Zambrano, S. A., & Programa de Investigación de Mantenimiento. Decanato de Investigación UNET. (2006). *Índices e Indicadores de Gestión de Mantenimiento en las Pymes del Estado Táchira*. 3er Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad Montevideo, Uruguay. <https://docplayer.es/51717725-Indices-e-indicadores-de-gestion-de-mantenimiento-en-las-pymes-del-estado-tachira.html>

Montano Vargas, E. (2013). Gestión de mantenimiento basado en la confiabilidad aplicado para una flota de volquetes de 50 toneladas para acarreo de material en la Mina Arasi. [Tesis profesional, Universidad Nacional del Callao] Repositorio de la Universidad Nacional del Callao. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/253>

Moubray, J. & Soporte & CIA. LTDA. (2004). *MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)*. [http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos\\_rcm\\_arquivos/RCM2%20EXPLICACION.pdf](http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos_rcm_arquivos/RCM2%20EXPLICACION.pdf)

Orcon García, E.A. (2015). Propuesta de un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis vibracional caso: Sistema de bombeo, unidad de espesadores del proyecto Toromocho. [Título profesional, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Library. <https://1library.co/document/yr200ooz-propuesta-mantenimiento-predictivo-analisis-vibracional-espesadores-proyecto-toromocho.html>

Ortiz Ramírez, G.E. (2014). Diseño e implementación del sistema de bombeo principal del Sector A – Mina Calenturita, propiedad de C.I. Prodeco S.A, La Loma, Cesar. [Proyecto de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia] Repositorio Institucional Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1517/1/TGT-258.pdf>

Pedroche Vázquez J.E. (2012) El cuadro de mando integral aplicado al mantenimiento. [Tesis master, Universidad de Sevilla] Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70397/fichero/EL+BSC+APLIC+ADO+AL+MANTENIMIENTO+-+TFM+-+Jose+Eloy+Pedroche+Vazquez.pdf>

PREDICTIVA21. (2021). *Predictiva 21 UPADI COPIMAN*.

<https://predictiva21.com/>

Propymes & Organización Techint. (2014). *Programa: Gestión del Mantenimiento*.

<https://cecma.com.ar/wp-content/uploads/2019/04/modulo-v-kpi-tablero-de-control.pdf>

Ramirez C.J., Moreno F.H. (2017). Elaboración de un análisis de criticidad y disponibilidad para la atracción X-TREME del Parque Mundo Aventura, tomando como referencia las normas, SAE JA1011 y SAE JA1012. [Tesis profesional, Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Bogotá] Repositorio Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/7854/MorenoRobayolHugo;jsessionid=AC0102A2643BF5CF81790C468E4C9A46?sequence=1>

Tamayo, M. & Tamayo. (2003). *El Proceso de la Investigación Científica* (Cuarta ed.). Limusa Noriega Editores.

<https://cucjonline.com/biblioteca/files/original/874e481a4235e3e6a8e3e4380d7adb1c.pdf>

Tavarez, L. A., Calixto, M. A., dos Santos, P. R., & da Silva, J. E. (2007). *Gestión Estratégica en Activos de Mantenimiento: Una Visión del Mantenimiento Centrado en el Negocio* (Técnica ed.). Gerenplanif

Venezuela. <https://pdfslide.net/documents/gestion-estrategica-activos-mantenimientolourival-tavares.html>

UNE Normalización Española. (2007). *UNE-EN ISO 14224:2006 (Ratificada) Industrias del petróleo, pe. . .* UNE. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0038228>

Uscátegui Cristancho P.J. (2014) Propuesta de mejoramiento de gestión de mantenimiento para el departamento de confiabilidad y proyectos en la empresa Petrosantander Colombia (INC). [Monografía de grado, Universidad Industrial de Santander] Biblioteca virtual Universidad Industrial de Santander.

<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/152309.pdf>

Valetin Vicente, V.F. (2014). Mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad mecánica de las excavadoras Cat 336d L en el Proyecto Toromocho. [ Tesis profesional, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3216>

Verdezoto Alvarez, N.E. (2015). Propuesta de la elaboración de un plan de mantenimiento predictivo, basado en la criticidad de los equipos del proceso de laminación en caliente para la empresa Andec S.A [Tesis profesional, Universidad de Guayaquil] Repositorio Institucional de la Universidad de Guayaquil.

<http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/8852>

Zegarra, M. (2016). Indicadores para la gestión del mantenimiento de equipos pesados. *Ciencia y Desarrollo*, 19(1), 25.

<https://doi.org/10.21503/cyd.v19i1.1219>

## ANEXO

Tabla 38

*Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Julio 2021*

N°	Familia	TAG	Equipo	Fecha	Down Time (Hrs)	Motivo de parada de equipo	Tipo de Mantto	Estado	Paro equipo
1	Bomba de concentrado	217-035	Bomba underflow 1002	1/07/2021	8.00	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
2	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	2/07/2021	2.00	Instalación de carrete de descarga en bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
3	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	7/07/2021	21.52	Cambio de bocina en zona prensaestopa de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
4	Bomba de concentrado	217-036	Bomba overflow 1002	7/07/2021	13.00	Cambio de bocina en zona prensaestopa de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
5	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	8/07/2021	34.00	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
6	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	9/07/2021	10.00	Verificación de alineamiento de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
7	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	13/07/2021	2.27	Cambio de empaquetaduras en prensaestopa de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
8	Bomba de concentrado	217-038	Bomba underflow 2002	14/07/2021	5.63	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
9	Bomba de concentrado	217-039	Bomba overflow 1001	13/07/2021	2.92	Cambio de carrete de succión en bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
10	Bomba de concentrado	217-039	Bomba overflow 1001	19/07/2021	7.00	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si

**Fuente:** *Historial de fallas de bombas de concentrado de Shougang Hierro Perú*

**Tabla 39***Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Agosto 2021*

N°	Familia	TAG	Equipo	Fecha	Down Time (Hrs)	Motivo de parada de equipo	Tipo de Manto	Estado	Paro equipo
1	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	1/08/2021	4.72	Cambio de empaquetaduras en prensaestopa de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
2	Bomba de concentrado	217-042	Bomba overflow 2002	4/08/2021	18.08	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
3	Bomba de concentrado	217-043	Bomba overflow 2002	4/08/2021	48.85	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
4	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	5/08/2021	26.67	Cambiar impulsor, reparación de platos de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
5	Bomba de concentrado	217-040	Bomba overflow 1002	6/08/2021	1.12	Tensado de correas de transmisión.	Correctivo	Noprogramado	Si
6	Bomba de concentrado	217-038	Bomba underflow 2002	7/08/2021	11.62	Revisión de componentes de bomba underflow 2002	Correctivo	Noprogramado	Si
7	Bomba de concentrado	217-042	Bomba overflow 2001	7/08/2021	0.50	Relleno de aceite en cilindro porta rodamientos.	Correctivo	Noprogramado	Si
8	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	8/08/2021	0.90	Inspección de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
9	Bomba de concentrado	217-040	Bomba overflow 1002	19/08/2021	4.50	Cambio de empaque en línea de descarga de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
10	Bomba de concentrado	217-040	Bomba overflow 1002	19/08/2021	10.72	Verificación de estado de válvula check de 8".	Correctivo	Noprogramado	Si
11	Bomba de concentrado	217-040	Bomba overflow 1002	20/08/2021	15.35	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
12	Bomba de concentrado	217-039	Bomba overflow 1001	23/08/2021	1.08	Tensado de correas de transmisión de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
13	Bomba de concentrado	217-039	Bomba overflow 1001	28/08/2021	1.08	Relleno de aceite en cilindro portarodamiento.	Correctivo	Noprogramado	Si
14	Bomba de concentrado	217-040	Bomba overflow 1002	28/08/2021	0.08	Relleno de aceite en cilindro portarodamientos.	Correctivo	Noprogramado	Si
15	Bomba de concentrado	217-042	Bomba overflow 2001	28/08/2021	0.08	Relleno de aceite en cilindro portarodamientos.	Correctivo	Noprogramado	Si
16	Bomba de concentrado	217-043	Bomba overflow 2002	28/08/2021	0.10	Relleno de aceite en cilindro portarodamientos.	Correctivo	Noprogramado	Si

*Fuente: Historial de fallas de bombas de concentrado de Shougang Hierro Perú*

**Tabla 40***Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Septiembre 2021*

N°	Familia	TAG	Equipo	Fecha	Down Time (Hrs)	Motivo de parada de equipo	Tipo de Mantto	Estado	Paro equipo
1	Bomba de concentrado	217-035	Bomba underflow 1001	1/09/2021	30.00	Alineamiento de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
2	Bomba de concentrado	217-040	Bomba overflow 1002	1/09/2021	11.50	Desmontar carrete de succión para limpieza de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
3	Bomba de concentrado	217-037	Bomba underflow 2001	1/09/2021	24.50	Alineamiento de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
4	Bomba de concentrado	217-040	Bomba overflow 1002	9/09/2021	1.78	Cambio de empaquetaduras de prensaestopa de bomba.	Correctivo	Noprogramado	Si
5	Bomba de concentrado	217-042	Bomba overflow 2001	11/09/2021	3.70	Cambio de aceite de cilindro portarodamientos.	Correctivo	Noprogramado	Si
6	Bomba de concentrado	217-043	Bomba overflow 2002	11/09/2021	3.68	Cambio de aceite de cilindro portarodamientos.	Correctivo	Noprogramado	Si
7	Bomba de concentrado	217-035	Bomba underflow 1001	12/09/2021	6.05	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
8	Bomba de concentrado	217-036	Bomba underflow 1002	21/09/2021	21.47	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
9	Bomba de concentrado	217-043	Bomba overflow 2002	21/09/2021	30.15	Inspección y reparación de tubería de succión.	Correctivo	Noprogramado	Si
10	Bomba de concentrado	217-037	Bomba underflow 2001	22/09/2021	15.50	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si

**Fuente:** *Historial de fallas de bombas de concentrado de Shougang Hierro Perú*

**Tabla 41***Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Julio 2022*

N°	Familia	TAG	Equipo	Fecha	Down Time (Hrs)	Motivo de parada de equipo	Tipo de Mantto	Estado	Paro equipo
1	Bomba de concentrado	217-038	Bomba de underflow 2002	5/07/2022	8.00	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si
2	Bomba de concentrado	217-036	Bomba de underflow 1002	11/07/2022	11.00	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si

*Fuente: Historial de fallas de bombas de concentrado de Shougang Hierro Perú***Tabla 42***Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Agosto 2022*

N°	Familia	TAG	Equipo	Fecha	Down Time (Hrs)	Motivo de parada de equipo	Tipo de Mantto	Estado	Paro equipo
1	Bomba de concentrado	217-036	Bomba de underflow 1002	3/08/2022	11.00	Cambio de bocina de prensaestopa.	Correctivo	Noprogramado	Si
2	Bomba de concentrado	217-039	Bomba de overflow 1001	11/08/2022	6.00	Reparación de codo de descarga.	Correctivo	Noprogramado	Si

*Fuente: Historial de fallas de bombas de concentrado de Shougang Hierro Perú*

**Tabla 43***Historial de fallas en Bombas de Concentrado – Septiembre 2022*

N°	Familia	TAG	Equipo	Fecha	Down Time (Hrs)	Motivo de parada de equipo	Tipo de Mantto	Estado	Paro equipo
1	Bomba de concentrado	217-038	Bomba underflow 2002	3/09/2022	5.00	Desmontaje y montaje de carrete de succión.	Correctivo	Noprogramado	Si
2	Bomba de concentrado	217-042	Bomba overflow 2001	3/09/2022	6.00	Desmontaje y montaje de carrete de succión.	Correctivo	Noprogramado	Si
3	Bomba de concentrado	217-037	Bomba underflow 2001	29/09/2022	5.00	Revisión y cambio de componentes internos.	Correctivo	Noprogramado	Si

**Fuente:** *Historial de fallas de bombas de concentrado de Shougang Hierro Perú*