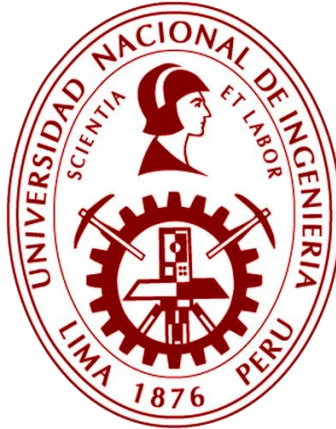


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Mejora del Control de Actividades de
Mantenimiento Preventivo en Equipos de una
Planta Concentradora de Minerales mediante el
Uso del software SAP módulo PM**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por

Manuel Román Mendoza

[0009-0002-9669-3456](tel:0009-0002-9669-3456)

Asesor

MCs. Jorge Vera Ermitaño

[000Y-000Y-YYYY-YYYY](tel:000Y-000Y-YYYY-YYYY)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Román, 2025)
Referencia/Reference	Román, M. (2025). <i>Mejora del Control de Actividades de Mantenimiento Preventivo en Equipos de una Planta Concentradora de Minerales mediante el Uso del software SAP módulo PM</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Lista de contenidos

Lista de tablas.....	6
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción	11
CAPÍTULO I. Generalidades	12
1.1. Antecedentes de la investigación	12
1.2. Identificación y descripción del problema de estudio	14
1.3. Formulación del problema	15
1.3.1. Problema principal.....	15
1.3.2. Problemas secundarios.....	15
1.4. Justificación e Importancia.....	15
1.5. Objetivos.....	16
1.5.1. Objetivo General	16
1.5.2. Objetivos Específicos	16
1.6. Hipótesis.....	17
1.6.1. Hipótesis general.....	17
1.6.2. Hipótesis específicas.....	17
1.7. Variables y operacionalización de variables.....	18
1.7.1. Variables.....	18
1.7.2. Operacionalización de variables	18
1.8. Metodología de la investigación	19
1.8.1. Unidad de análisis	19
1.8.2. Tipo, enfoque y nivel investigación	19
1.8.3. Diseño de investigación	20
1.8.4. Fuente de información.....	20
1.8.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	20

1.8.6. Análisis y procesamiento de datos	20
CAPÍTULO II. Marco teórico y marco conceptual	22
2.1. Marco teórico.....	22
2.1.1. Mantenimiento	22
2.1.1.1. Mantenimiento correctivo	22
2.1.1.2. Mantenimiento predictivo.....	23
2.1.1.3. Mantenimiento preventivo	24
2.1.1.4. Otros métodos de mejora del mantenimiento	25
2.1.2. Software de gestión de mantenimiento	32
2.1.2.1. Ventajas del uso de software de gestión de mantenimiento	32
2.1.2.2. Gestión de mantenimiento asistida por computadora	33
2.1.2.3. Fractal One	35
2.1.2.4. Systems Applications and Products in Data Processing (SAP)	38
2.1.3. Planta concentradora de minerales	40
2.1.3.1. Trituración o chancado	41
2.1.3.2. Molienda.....	45
2.1.3.3. Separación por flotación.....	47
2.1.3.4. Deshidratación	48
2.2. Marco conceptual	49
CAPÍTULO III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	50
3.1. Equipos de planta concentradora	50
3.2. Identificación de los equipos críticos de la planta concentradora de minerales según enfoque RCM	53
3.3. Definición de las actividades de mantenimiento preventivo	55
3.4. Implementación del módulo PM del software SAP	55
3.4.1. Proceso central de mantenimiento preventivo	55
3.4.2. Implementación del SAP-PM	59

3.4.2.1.	Definir la estrategia de mantenimiento en SAP	60
3.4.2.2.	Crear el punto de media	65
3.4.2.3.	Crear la hoja de ruta de mantenimiento	66
3.4.2.4.	Crear el plan de mantenimiento	71
CAPÍTULO IV. Resultados, contrastación de hipótesis y discusión de resultados		76
4.1.	Identificación de los equipos críticos de la planta concentradora de minerales según el enfoque RCM	76
4.2.	Definición de las actividades de mantenimiento preventivo	77
4.3.	Implementación del módulo PM del software SAP	78
4.4.	Contrastación de hipótesis.....	79
CONCLUSIONES		82
RECOMENDACIONES		84
REFERENCIAS		85
ANEXOS		88

Lista de tablas

Tabla 1. Variables e indicadores de la investigación	18
Tabla 2. Ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo	24
Tabla 3. Clasificación de los riesgos según su naturaleza	28
Tabla 4. Ventajas del uso de software de gestión de mantenimiento	32
Tabla 5. Principales módulos del sistema SAP y sus funciones	39
Tabla 6. Listado general de equipos de planta concentradora de minerales	50
Tabla 7. Clasificación de consecuencias de la de la bomba centrífuga ASH-200 MCC, según RCM.....	54
Tabla 8. Matriz de criticidad según RCM	54
Tabla 9. Modos de falla y clasificación de criticidad	76
Tabla 10. Estrategias RCM y acciones recomendadas.....	77
Tabla 11. Hoja de ruta del mantenimiento preventivo – Bomba ASH-200 MCC N°01 ..	78

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama esquemático de una trituradora de mandíbulas primaria	42
Figura 2. Diagrama esquemático de trituradoras secundarias: (a) de cono; (b) de rodillos y (c) de impacto	44
Figura 3. Diagrama de proceso central de mantenimiento preventivo	56
Figura 4. Ciclo de mejora continua del proceso central de mantenimiento	56
Figura 5. Proceso de identificación del trabajo	57
Figura 6. Proceso de planificación	57
Figura 7. Proceso de programación	58
Figura 8. Proceso de ejecución	58
Figura 9. Proceso de cierre	59
Figura 10. Proceso de análisis	59
Figura 11. Pantalla inicial de la transacción IP11	62
Figura 12. Llenado de la transacción IP11 para la estrategia de mantenimiento.	63
Figura 13. Paquete de mantenimiento: (a) selección; y (b) registro de información	64
Figura 14. (a) Selección del icono SecuencPaq; y (b) secuencia de paquetes creados para el plan de mantenimiento	64
Figura 15. Transacción IK11: (a) creación del punto de medida; y (b) asignación de parámetros	65
Figura 16. Asignación de parámetros para la creación del punto de medida	66
Figura 17. Transacción IA05. Pantalla de inicio de las creación del punto de medida..	67
Figura 18. Asignación de parámetros para la creación de la Hoja de Ruta	68
Figura 19. Selección del icono Operación	68
Figura 20. Asignación de actividades en la Hoja de Ruta	69
Figura 21. Asignación del paquete de mantenimiento	70
Figura 22. Asignación de insumos y repuestos para el mantenimiento de la bomba	70
Figura 23. Pantalla inicial de la transacción IP01.	71

Figura 24. Asignación de parámetros para la creación del plan de mantenimiento, pestaña Ciclos plan de mantenimiento	73
Figura 25. Asignación de parámetros en pestaña Parám. programación plan mantenimiento	74
Figura 26. Plan de mantenimiento preventivo 502677: (a) generado; y (b) lanzado y listo para tomar	75
Figura 27. Pantalla de programación del plan preventivo en SAP-PM	79

Resumen

En la Unidad Minera Yauliyacu, la gestión del mantenimiento se realiza mayormente con Excel, lo que genera limitaciones como la actualización manual de datos, errores, demoras en la toma de decisiones y planificación inadecuada. Además, la falta de visibilidad en tiempo real impide un seguimiento efectivo del historial de mantenimiento, lo que afecta la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. En un contexto donde la automatización y la eficiencia son esenciales, los softwares de gestión de mantenimiento permiten optimizar recursos, tomar decisiones oportunas y mantener la productividad. Por ello, el objetivo del trabajo fue mejorar el control de las actividades de mantenimiento preventivo en equipos de una planta concentradora de minerales mediante el uso del software SAP (*Systems Applications and Products in Data Processing*) módulo PM (*Plant Maintenance*). Se utilizó el enfoque de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para identificar equipos críticos y establecer las actividades preventivas correspondientes. Luego, se implementó el módulo PM del software SAP. El análisis RCM identificó como equipo crítico la bomba ASH-200 MCC N°01, presentando fallas principales en el sello y el motor eléctrico. Para mejorar su confiabilidad, se propuso mantenimiento preventivo y rediseño, lo que dio lugar a una hoja de ruta técnica. Esta fue registrada en el software SAP-PM mediante un plan de mantenimiento basado en el horómetro, que generó automáticamente llamadas programadas con fechas de inicio, ejecución, tipo de paquete y estado (Programado o En espera), facilitando una planificación eficiente y precisa. En conclusión, la aplicación del enfoque RCM y la correcta configuración del SAP-PM permitieron optimizar la gestión del mantenimiento preventivo. Se logró una mejora sustancial en la eficiencia operativa, mayor confiabilidad de los equipos críticos y alineamiento con las mejores prácticas de mantenimiento industrial.

Palabras clave: Mantenimiento; Planta concentradora; Software, SAP; PM

Abstract

At the Yauliyacu Mining Unit, maintenance management is mostly performed using Excel, which generates limitations such as manual data updating, errors, delays in decision-making, and inadequate planning. Furthermore, the lack of real-time visibility prevents effective maintenance history tracking, which impacts equipment reliability and availability. In a context where automation and efficiency are essential, maintenance management software allows for optimizing resources, making timely decisions, and maintaining productivity. Therefore, the aim of this study was to improve the control of preventive maintenance activities on equipment at a mineral concentration plant through the use of the SAP PM module. The Reliability-Centered Maintenance (RCM) approach was used to identify critical equipment and establish the corresponding preventive activities. The PM module of the SAP software was then implemented. The RCM analysis identified the ASH-200 MCC pump N°01 as critical equipment, presenting primary failures in the seal and electric motor. To improve reliability, preventive maintenance and redesign were proposed, resulting in a technical roadmap. This was recorded in the SAP-PM software using the hourmeter-based maintenance plan, which automatically generated scheduled calls with start dates, execution dates, package type, and status (Scheduled or On Hold), facilitating efficient and accurate planning. In conclusion, the application of the RCM approach and the correct configuration of SAP-PM enabled the optimization of preventive maintenance management. A substantial improvement in operational efficiency, increased reliability of critical equipment, and alignment with industrial maintenance best practices were achieved.

Keywords: Maintenance; Concentration Plant; Software, SAP; PM

Introducción

La optimización del mantenimiento preventivo reduce tiempos de inactividad, extiende la vida útil de los equipos y disminuye costos operativos. La integración de SAP PM centraliza la planificación y seguimiento, mejorando la coordinación. Una gestión eficiente en planificación, ejecución y monitoreo permite respuestas proactivas y reduce errores. El uso adecuado del módulo PM de SAP, personalizado a las necesidades de una planta concentradora de minerales, mejora la eficiencia del mantenimiento y adapta sus funcionalidades a los equipos electromecánicos, optimizando el sistema general de mantenimiento. En tal sentido, el objetivo general del presente trabajo fue mejorar el control de actividades de mantenimiento preventivo en equipos de una planta concentradora de minerales mediante el uso del software SAP módulo PM. Para ello, se divide este documento en cuatro capítulos.

En el capítulo I se representan los aspectos generales del trabajo, incluyendo los antecedentes, el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos. También se detallan las variables, las hipótesis formuladas y el enfoque metodológico adoptado.

El capítulo II abarca el marco teórico relacionado con los tipos de mantenimiento, los software de gestión de mantenimiento y datos relevantes de una planta concentradora de minerales. Además, incluye el marco conceptual, donde se explican las bases teóricas que sustentan el desarrollo del trabajo.

En el capítulo III trata sobre el desarrollo del trabajo que consta de los equipos de una planta concentradora, identificación de equipos críticos, definición de actividades de mantenimiento e implementación del SAP-PM.

El capítulo IV presenta los resultados obtenidos, su respectiva discusión y la contrastación de hipótesis relacionada con la mejora en el control de las actividades de mantenimiento preventivo en los equipos de una planta concentradora de minerales, a través de la implementación del módulo PM del software SAP.

CAPÍTULO I.

Generalidades

1.1. Antecedentes de la investigación

Gómez (2017) realizó la optimización de la gestión del mantenimiento en los equipos de la planta de beneficio de la unidad operativa Selene de la empresa minera Ares. Su intención fue mejorar el uso de los recursos existentes, como el sistema SAP, para disminuir los costos de mantenimiento y aumentar la disponibilidad de los equipos de la planta de beneficio. Realizó un análisis de la gestión actual en el área de mantenimiento, en donde identificó la ausencia de directrices estructuradas para una correcta administración del mantenimiento de los equipos. También, detectó una falta de capacitación del personal en el uso del sistema SAP, lo que se reflejó en el uso de hojas de Excel para la planificación y programación de mantenimientos; además, de la ausencia de un historial de equipos. Asimismo, reportó que las reparaciones no se registraban en el inventario, lo que causaba duplicidad en las compras y aumentaba su valor, todo ello, conllevó al incremento de los costos de mantenimiento, superando el presupuesto anual destinado para dicho propósito al final de los últimos años (Gómez, 2017).

Carpio (2018) menciona que existen diversas herramientas que apoyan a la ejecución de las tareas de mantenimiento en una empresa. Esta investigación analiza el software SAP (*Systems Applications and Products in Data Processing*) - PM (*Plant Maintenance*) como una herramienta para gestionar los mantenimientos, puesto que este software ofrece varios módulos para la gestión integral de una empresa. En particular, para la programación y planificación de mantenimientos, se utiliza el módulo PM, que permite crear órdenes de trabajo para cada plan de mantenimiento, incluyendo una lista de actividades con los tiempos planificados. Además, facilita el control y registro

detallado de todas las actividades realizadas en los equipos, así como su historial de fallas (Carpio, 2018).

Hilario (2022) llevó a cabo un análisis de la Compañía Minera Casapalca e identificó que mantener un alto índice de disponibilidad mecánica para los equipos de su planta concentradora es crucial. Un bajo índice de disponibilidad puede acarrear diversas consecuencias negativas para la planta. En particular, una parada en la Planta Concentradora de Casapalca resulta en una pérdida de \$9,500.00 por cada hora de inactividad. Esta situación ocurre debido a fallos inesperados en los equipos, lo que afecta la meta diaria de tratamiento de mineral, que es de 4500 toneladas. Cada hora de parada temporal reduce la producción en 190 toneladas, lo cual refleja una baja disponibilidad mecánica. Para realizarlo, se propone diseñar un plan de mantenimiento que mejore la disponibilidad de los equipos. Esto implica recopilar y organizar toda la información relacionada con los avisos de mantenimiento para elaborar un programa de mantenimiento preventivo y predictivo en los períodos correspondientes. Implementando este plan, que incluye actividades de mantenimiento preventivo y predictivo, lista de repuestos críticos, programas de cambio de repuestos, formatos de tareas definidas, procedimientos de mantenimiento, monitoreo de vibraciones, control de temperatura, análisis de aceite, desgaste de componentes, formatos de inspección y capacitación del personal, se logró aumentar el indicador de disponibilidad promedio en un 3.63% (Hilario, 2022).

Gutierrez (2024), analizó la disponibilidad de equipos empleados en el proceso de filtrado de relaves y relleno en pasta de una unidad minera mediante la implementación del programa SAP modulo PM. Para ello, realizó un diseño del plan de mantenimiento que contempló la identificación de equipos críticos para luego definir actividades de mantenimiento preventivo a partir de la información recopilada en cada equipo crítico, las recomendaciones del fabricante y el análisis de las condiciones operativas del equipo en conjunto con el personal de supervisión y operación.

Posteriormente, se implementó el SAP PM elaborando los planes de mantenimiento en cada uno de los equipos, luego de ello, se analizó el indicador de disponibilidad. Los resultados mostraron un incremento del 3% en la disponibilidad, esto redujo el tiempo de paradas imprevistas, lo que contribuyó a optimizar la continuidad operativa. Asimismo, la planificación del mantenimiento preventivo redujo fallas inesperadas, evitando compras urgentes y uso extra de recursos, permitiendo un mejor control de costos (Gutierrez, 2024).

1.2. Identificación y descripción del problema de estudio

Actualmente, la gestión del mantenimiento en la Unidad Minera Yauliyacu, en un gran porcentaje, se realiza utilizando hojas de Excel, lo que representa varias limitaciones significativas. Aunque este enfoque ha sido funcional en el pasado, enfrenta problemas cruciales que afectan la eficiencia y eficacia de los mantenimientos preventivos en los equipos. La modificación y actualización manual de datos en hojas de Excel consume un tiempo considerable, esto incluye la actualización de registros de equipos, la programación de próximos mantenimientos y el seguimiento de horas de operación (horómetros). La falta de automatización en estos procesos incrementa el riesgo de errores y retrasa la toma de decisiones, lo que puede llevar a una planificación inadecuada y a una respuesta tardía ante posibles fallas.

Además, la falta de integración y visibilidad en tiempo real dificulta el seguimiento del historial de mantenimiento de cada equipo; es decir, la información sobre cuándo se realizó por última vez y las fechas de futuras intervenciones no siempre está actualizada ni es rápidamente accesible, lo que puede resultar en mantenimientos tardíos o no planificados, lo cual afecta la disponibilidad y confiabilidad de los equipos. A pesar de contar con el software SAP en su módulo PM, este se utiliza de manera básica, principalmente, para la ubicación técnica de los equipos en el sistema y en el requerimiento de algunos materiales utilizados en los trabajos realizados. Esto representa una subutilización del potencial completo de SAP PM, que ofrece una amplia

gama de funcionalidades para la gestión integral del mantenimiento como es la programación automatizada, desarrollo de estrategias, creación de planes, creación de hojas de ruta, seguimiento de indicadores de rendimiento, la integración con otros módulos del sistema y la generación de informes avanzados.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema principal

¿En qué medida el uso del software SAP módulo PM mejora el control de las actividades de mantenimiento preventivo en los equipos de una planta concentradora de minerales?

1.3.2. Problemas secundarios

- a) ¿De qué manera el enfoque RCM permite identificar los equipos críticos de la planta concentradora de minerales para priorizar su mantenimiento preventivo?
- b) ¿Cómo definir las actividades de mantenimiento preventivo correspondientes a los equipos críticos identificados en la planta concentradora de minerales?
- c) ¿Cómo implementar planes de mantenimiento en el módulo PM del software SAP para mejorar la gestión del mantenimiento preventivo en la planta concentradora de minerales?

1.4. Justificación e Importancia

La optimización de la gestión de mantenimiento preventivo es esencial para minimizar los tiempos de inactividad no planificados y mejorar la disponibilidad de los equipos. La integración de SAP PM con hojas de Excel proporciona una plataforma centralizada para la planificación y seguimiento de las actividades de mantenimiento, facilitando la coordinación entre diferentes departamentos y equipos. Esta optimización

no solo reducirá los tiempos de inactividad, sino que también aumentará la vida útil de los equipos y reducirá los costos operativos.

Una planificación, ejecución y monitoreo eficientes son fundamentales para el éxito de las actividades de mantenimiento preventivo. Mejorar estos aspectos permite una coordinación más efectiva entre los equipos de mantenimiento y una gestión más eficiente de los recursos. La visibilidad en tiempo real de las tareas y recursos favorece una gestión más proactiva, reduciendo el riesgo de errores y mejorando la respuesta a cualquier problema que surja. Esto garantiza una ejecución más fluida y efectiva de las actividades de mantenimiento preventivo.

El software SAP en su módulo PM es una herramienta potente con una amplia gama de capacidades que, utilizándolo adecuadamente, mejora significativamente la gestión del mantenimiento. Implementar mejores prácticas y personalizar el software para las necesidades específicas de la planta concentradora asegura que se adapten las funcionalidades del software a los requisitos particulares del mantenimiento de los equipos electromecánicos. Esto no solo mejora la eficiencia del mantenimiento, sino que también permite un enfoque más orientado a las necesidades específicas de la planta, optimizando así el rendimiento general del sistema de mantenimiento.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Mejorar el control de actividades de mantenimiento preventivo en equipos de una planta concentradora de minerales mediante el uso del software SAP módulo PM.

1.5.2. Objetivos Específicos

- a) Identificar los equipos críticos de la planta concentradora de minerales según enfoque RCM.

- b) Definir las actividades de mantenimiento preventivo correspondientes a los equipos críticos identificados.
- c) Implementar planes de mantenimiento en el módulo PM del software SAP para la mejora de la gestión del mantenimiento preventivo en la planta concentradora.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

El uso del software SAP módulo PM mejora significativamente el control de las actividades de mantenimiento preventivo en los equipos de una planta concentradora de minerales, al permitir una planificación más eficiente, una implementación de mejores prácticas y personalización de las funcionalidades del software y un alto cumplimiento de las tareas programadas.

1.6.2. Hipótesis específicas

- a) La aplicación del enfoque RCM permite identificar con mayor precisión los equipos críticos de la planta concentradora, facilitando su priorización en el plan de mantenimiento preventivo.
- b) La definición de actividades de mantenimiento preventivo basada en criterios técnicos adecuados para los equipos críticos identificados en la planta concentradora permite mejorar la planificación, reducir las fallas imprevistas y optimizar la eficiencia operativa.
- c) La implementación de planes de mantenimiento en el módulo PM del software SAP mejora la gestión del mantenimiento preventivo en la planta concentradora al aumentar el control, la trazabilidad y el cumplimiento de las actividades programadas.

1.7. Variables y operacionalización de variables

1.7.1. Variables

Variable independiente: Uso del software SAP módulo PM.

Variable dependiente: Control de actividades de mantenimiento preventivo.

1.7.2. Operacionalización de variables

Las variables de la investigación con sus dimensiones e indicadores, definidos para facilitar la evaluación de aspectos clave vinculados al uso del software SAP módulo PM en el control del mantenimiento preventivo, se aprecian en la Tabla 1.

Tabla 1.
Variables e indicadores de la investigación

Operacionalización de variables			
Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador
Variable independiente (VI): Uso del software SAP módulo PM	Consiste en aplicar una herramienta informática especializada para planificar, programar, ejecutar, registrar y controlar actividades de mantenimiento preventivo, optimizando la gestión de equipos en entornos industriales como minería.	Planificación del mantenimiento	Número de planes de mantenimiento programados en SAP PM
		Registro y trazabilidad de actividades	Número de órdenes de trabajo registradas en el sistema
			Llenado completo de la información registrada por orden
		Accesibilidad al historial técnico de cada equipo	
Variable dependiente (VD): Control de actividades de mantenimiento preventivo	Es la supervisión, verificación y evaluación del cumplimiento de tareas planificadas en equipos industriales, asegurando su ejecución oportuna, con los recursos adecuados, para reducir fallas no	Gestión de recursos	Registro de recursos humanos asignados por orden de trabajo Registro de repuestos utilizados por actividad de mantenimiento.
		Cumplimiento del mantenimiento programado	Porcentaje de órdenes de trabajo ejecutadas según el cronograma
			Reducción de fallas no programadas
		Eficiencia en la ejecución	Tiempo medio de cierre de órdenes de mantenimiento

programadas y
garantizar la
continuidad operativa.

Cumplimiento de actividades
conforme a procedimientos
técnicos

1.8. Metodología de la investigación

1.8.1. Unidad de análisis

Las actividades de mantenimiento preventivo realizadas en los equipos críticos de una planta concentradora de minerales, gestionadas mediante el empleo del software SAP-PM.

1.8.2. Tipo, enfoque y nivel investigación

a) Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, debido a que busca resolver un problema específico, en un contexto real relacionado a la gestión del mantenimiento en una planta concentradora de minerales mediante, la implementación del software SAP-PM.

b) Enfoque de investigación

La investigación tiene enfoque cuantitativo porque se llevará a cabo el análisis y recolección de información del número de planes de mantenimiento programados en SAP PM, número de órdenes de trabajo registradas en el sistema, registro de recursos humanos asignados por orden de trabajo, registro de repuestos utilizados por actividad de mantenimiento, porcentaje de órdenes de trabajo ejecutadas según el cronograma, frecuencia de paradas imprevistas por equipo crítico, tiempo medio entre fallas, tiempo medio de cierre de órdenes de mantenimiento, entre otros.

c) Nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo y explicativo. Es descriptivo porque permite caracterizar las condiciones actuales del control de las actividades de mantenimiento preventivo en la planta concentradora; y es explicativo porque busca demostrar cómo el uso del software SAP módulo PM influye significativamente en la mejora del control de dichas actividades.

1.8.3. Diseño de investigación

Esta investigación tiene un diseño no experimental, puesto que se realiza la observación y evaluación de las condiciones del control de mantenimiento preventivo antes y después de implementar el módulo PM del software SAP, sin manipular directamente las variables, solo registrando los cambios observados en el entorno real.

1.8.4. Fuente de información

La investigación se basará principalmente en datos primarios obtenidos del manual de uso del software SAP módulo PM y de información técnica recopilada desde fuentes oficiales disponibles en la web.

1.8.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se realizará mediante análisis documental de reportes de mantenimiento, manuales técnicos del fabricante y observación directa de las actividades preventivas. Los instrumentos permitirán evaluar el control y gestión del mantenimiento en equipos críticos seleccionados.

1.8.6. Análisis y procesamiento de datos

Se realizará mediante técnicas cuantitativas, utilizando herramientas estadísticas descriptivas como porcentajes y gráficos comparativos para evaluar el control de las actividades de mantenimiento antes y después de la implementación del módulo SAP-PM. Los datos obtenidos del sistema SAP serán organizados y procesados

con el apoyo de Excel, esto permitirá identificar tendencias, medir mejoras sobre el cumplimiento del plan de mantenimiento, y determinar la eficiencia operativa en los equipos críticos.

CAPÍTULO II.

Marco teórico y marco conceptual

2.1. Marco teórico

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos que sustentan el presente informe. Se abordan conceptos clave relacionados con el mantenimiento industrial, sus tipos, beneficios y limitaciones, así como el uso de software especializado para la gestión del mantenimiento, destacando sus principales módulos y ventajas operativas. Asimismo, se incluye una descripción general del funcionamiento de una planta concentradora de minerales. Finalmente, se revisan aspectos teóricos vinculados al análisis de sistemas y los módulos que integran herramientas informáticas como SAP.

2.1.1. Mantenimiento

Conjunto de actividades diseñadas para garantizar que los equipos operen de manera eficiente y segura, estas actividades se clasifican principalmente en diferentes tipos, cada uno con un enfoque particular para maximizar la disponibilidad y el rendimiento de los equipos, con el propósito de prevenir las fallas y reducir los tiempos de inactividad. También el mantenimiento es el proceso de preservar el buen estado de un sistema para garantizar su disponibilidad y confiabilidad durante un período específico o restaurarlo a sus condiciones normales de funcionamiento (de Castro-Cros, Velasco, & Angulo, 2021; Mobley, 2002).

Los tres tipos principales de métodos mantenimiento son el correctivo, preventivo y predictivo, tal cuales se describen a continuación:

2.1.1.1. Mantenimiento correctivo

Es un procedimiento no programado que busca resolver problemas y restaurar el funcionamiento normal, que implica la realización de una serie de tareas de reparación

no programadas, con la finalidad de restaurar la función de un equipo cuando se verifica que el mismo no se encuentra en condiciones de seguir operando, también abordar fallas, mal funcionamiento o daños identificados mediante monitoreo remoto o inspecciones de rutina (Abdulla, Sleptchenko, & Nayfeh, 2024). En estos casos es necesario realizar paros imprevistos que comúnmente tienen sus orígenes en desperfectos no detectados durante las inspecciones predictivas, errores operacionales, ausencia de tareas de mantenimiento y requerimientos de producción que generan políticas como la de “repara cuando falle” (Mobley, 2002).

2.1.1.2. Mantenimiento predictivo

Es un mantenimiento planificado y programado, de carácter preventivo, que se fundamenta en el análisis técnico, programas de inspección y reparación de equipos, el cual se adelanta al suceso de las fallas, es decir, es un mantenimiento que detecta las fallas potenciales con el sistema en funcionamiento. La condición operacional del equipo se determina realizando un monitoreo continuo de los parámetros claves de operación (Mobley, 2002).

El mantenimiento predictivo es el medio para mejorar la productividad, la calidad del producto y la eficacia general de las plantas de fabricación y producción, en este tipo de mantenimiento se utiliza la monitorización directa del estado mecánico, la eficiencia del sistema y otros indicadores para determinar el tiempo medio real hasta el fallo o la pérdida de eficiencia de cada máquina y sistema de una planta (Mobley, 2002). Un programa de mantenimiento predictivo reduce averías imprevistas, garantiza condiciones mecánicas aceptables y detecta fallos tempranos. Al identificar problemas a tiempo, se minimizan daños mayores y se evitan reparaciones costosas en equipos de planta (Mobley, 2002).

Normalmente, se utilizan cinco técnicas no destructivas para la gestión del mantenimiento predictivo, los cuales son: (1) monitoreo de vibraciones, (2) monitoreo de parámetros de proceso, (3) termografía, (4) tribología e (5) inspección visual. Cada

técnica cuenta con un conjunto de datos único que ayuda al gerente de mantenimiento a determinar la necesidad real de mantenimiento (Mobley, 2002).

2.1.1.3. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo, también denominado mantenimiento planificado, es un enfoque sistemático orientado a ejecutar acciones programadas con el objetivo de evitar fallas en equipos y sistemas antes de que estas ocurran. Se realiza dentro de plazos establecidos, lo que permite anticipar posibles fallos y reducir el riesgo de accidentes (Dong et al., 2023). Este tipo de mantenimiento implica la planificación y ejecución periódica de tareas como inspecciones, lubricación, ajustes y reemplazo de componentes, basándose en criterios de tiempo o uso del equipo. De esta manera, no solo se previenen averías, sino que también se optimiza el rendimiento operativo y se prolonga la vida útil de los activos (Dong et al., 2023; Singal et al., 2023).

Es fundamental mantener un registro de las horas de operación y mantenimiento, así como del índice de fallas y el reemplazo de componentes, entre otros aspectos. Los sistemas de procesamiento de datos actuales como los softwares facilitan la evaluación del rendimiento de un equipo y sus posibles fallas, considerando factores como el uso, las condiciones ambientales, la habilidad del operador y otras variables relevantes (Boyce, 2012).

Las ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo son resumidas en la Tabla 2.

Tabla 2.
Ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo

Categoría	Aspecto	Descripción
Ventajas	Reducción de fallos	Diseñado para reducir fallos en los equipos mediante inspecciones y mantenimientos programados que permiten detectar y corregir problemas antes de generar costos elevados.
	Mejora de la fiabilidad	La implementación de un programa de mantenimiento preventivo aumenta la fiabilidad de los equipos, lo que a su vez asegura un funcionamiento más consistente y eficiente.

Desventajas	Optimización de costos a largo plazo	Aunque puede implicar un costo inicial para establecer un programa de mantenimiento preventivo, a largo plazo ayuda a reducir los costos asociados con reparaciones inesperadas y el tiempo de inactividad.
	Extensión de la vida útil del equipo	El mantenimiento preventivo prolonga la vida útil de los equipos, generando un ahorro significativo para la organización.
	Seguridad laboral	Un mantenimiento regular de los equipos contribuye a un entorno de trabajo más seguro, esto ayuda a prevenir accidentes y lesiones relacionadas con fallos de equipos
	Costos iniciales elevados	La implementación del mantenimiento preventivo exige recursos humanos y materiales, esto representa un desafío para ciertas organizaciones.
	Intervenciones innecesarias	Al basarse en un calendario fijo, existe la posibilidad de realizar mantenimiento innecesario en equipos que no lo requieren, lo que puede llevar a un uso ineficiente de los recursos.
	Dependencia de la programación	El mantenimiento preventivo puede no adaptarse a las condiciones cambiantes de operación. Si no se revisan regularmente las frecuencias de mantenimiento, se pueden realizar intervenciones prematuras o tardías.
	Requiere registro y seguimiento	La eficacia del mantenimiento preventivo depende de un seguimiento meticuloso y un registro preciso de las actividades de mantenimiento, lo que puede ser laborioso y requerir un sistema adecuado de gestión de datos.

2.1.1.4. Otros métodos de mejora del mantenimiento

Otros enfoques de gestión que se han desarrollado incluyen el Mantenimiento Productivo Total (TPM - *Total Productive Maintenance*) y el Mantenimiento Centrado en la confiabilidad (RCM - *Reliability Centred Maintenance*). Estos métodos surgieron como respuestas eficaces para corregir o compensar las deficiencias identificadas en los sistemas tradicionales de mantenimiento.

a) Mantenimiento Productivo Total (TPM)

Es una estrategia integral de mantenimiento, el cual apunta a mejorar la confiabilidad del equipo, reducir el tiempo de inactividad y aumentar la productividad general en las industrias manufactureras. Este tipo de mantenimiento se basa en el principio de que cada operador y empleado de mantenimiento es responsable del

mantenimiento del equipo, asimismo, permite la colaboración ya que el operador puede ayudar con las actividades de mantenimiento rutinarias y simples, mientras que los empleados de mantenimiento se enfocan en tareas de mantenimiento más complejas (Shannon et al., 2023).

El Instituto Japonés de Mantenimiento de Plantas (JIPM - *Japanese Institute of Plant Maintenance*) describe el TPM como un sistema de mantenimiento que cubre la vida útil total del equipo en cada área de la organización, e incluye la planificación, fabricación y mantenimiento. También, el TPM es reconocido como un pilar o herramienta clave de *Lean Manufacturing* y *Lean Six Sigma*, puesto que, se enfoca en optimizar la productividad del equipo y la línea, esto beneficia la reducción de desperdicios y es un pilar importante en los programas de mejora continua. Aparte de ello, TPM se ha vinculado con los beneficios de *Lean-Green* y la sostenibilidad por su menor uso de materiales, consumo de energía, reducción de emisiones tóxicas y reducción general de desechos (Shannon et al., 2023).

b) Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

Es una metodología sistemática orientada a optimizar los requisitos de mantenimiento de los activos físicos de una organización. Su objetivo principal es identificar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para garantizar la disponibilidad, seguridad y funcionalidad de los equipos, considerando tanto los costos de reparación como el impacto de las fallas en la operación (Mobley, 2002). A diferencia de enfoques tradicionales que asumen que todas las máquinas inevitablemente fallarán, el RCM reconoce que, si los sistemas son correctamente diseñados, instalados, operados y mantenidos, su vida útil puede ser prácticamente indefinida y sus fallas no necesariamente aleatorias. De hecho, la mayoría de las fallas tienen causas específicas, como errores humanos o procedimientos de reparación deficientes. Solo en casos extremos, influencias externas o errores operativos graves pueden provocar fallas instantáneas (Mobley, 2002; Zeinalnezhad et al., 2020).

El RCM ha sido aplicada con éxito en sectores altamente exigentes como la aviación, defensa, energía nuclear y petróleo, demostrando ser una de las estrategias más eficaces para reducir costos, minimizar el tiempo de inactividad y mejorar la eficiencia operativa. Este método de mantenimiento permite a las organizaciones tomar decisiones fundamentadas sobre sus programas de mantenimiento, promoviendo un entorno seguro, confiable y económicamente sostenible (Zeinalnezhad et al., 2020). El RCM ofrece a los responsables de mantenimiento un enfoque sistemático para asegurar la operatividad de los equipos y evitar fallas. Este proceso se basa en la planificación estratégica de acciones, fundamentadas en datos cualitativos y cuantitativos del sistema evaluado, como los indicadores MTBF (*Mean Time Between Failures*) o tiempo medio entre fallos, MTTR (*Mean Time To Repair*) o tiempo medio de reparación y la tasa de fallos, entre otros indicadores. Para la determinación del MTBF y MTTR se emplean la ecuaciones (1) y (2), respectivamente (Gutierrez, 2024):

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Número de fallas}} \quad (1)$$

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de fallas}} \quad (2)$$

Para integrar el RCM en un plan de mantenimiento, se necesita definir claramente los objetivos específicos de este tipo de mantenimiento y estructurar las acciones necesarias para asegurar la funcionalidad del sistema. Además, es importante recordar que el RCM se fundamenta en la idea de que todos los equipos presentan riesgos inherentes que deben ser gestionados para mantener su fiabilidad. En la Tabla 3 se detalla la clasificación de los riesgos en tres categorías (Fracttal, 2024):

Tabla 3.
Clasificación de los riesgos según su naturaleza

Categoría de riesgo	Descripción
Fallos funcionales	Fallos que impiden que el equipo cumpla con la función requerida.
Fallos latentes	No generan un fallo funcional inmediato, pero podrían ocasionarlo si no se corrigen.
Degradaciones	Pérdida gradual del rendimiento del equipo a lo largo del tiempo.

- **Enfoque sistemático del RCM**

Para gestionar de manera eficiente los riesgos descritos en la Tabla 2, el RCM emplea un enfoque sistemático que permite identificar y priorizar las actividades de mantenimiento más adecuadas. Este método se desarrolla a través de 11 pasos estructurados, los cuales son:

1. **Formar un equipo multidisciplinario:** Reúne a un grupo de trabajo integrado por profesionales de mantenimiento, ingenieros, operadores, gerentes y otros expertos relevantes, que será responsable de implementar el RCM (Fractal, 2024).
2. **Identificar los activos críticos:** Reconoce los activos fundamentales para el funcionamiento de las operaciones de la organización, cuya falla podría afectar significativamente la producción, la seguridad o los costos. Estos activos serán el foco del RCM (Fractal, 2024).
3. **Definir las funciones de los activos:** Establece con claridad las funciones específicas que desempeñan los activos en el contexto operativo de la organización, comprendiendo las tareas que realizan para alcanzar los objetivos (Fractal, 2024).
4. **Realizar el análisis de modos de falla:** Lleva a cabo un análisis sistemático para identificar los diferentes modos de fallo posibles en cada activo. Evalúa cómo y por qué podrían ocurrir estos fallos, así como las causas raíz (Fractal, 2024).

5. **Evaluar las consecuencias de los modos de falla:** Examina y comprende las consecuencias potenciales de los modos de falla identificados en términos de seguridad, producción, calidad y costos, priorizando según su impacto y riesgo (Fracttal, 2024).
6. **Establecer criterios de criticidad:** Define criterios claros para evaluar la criticidad de los activos según su impacto en la producción, la seguridad y los costos, lo que ayudará a priorizar recursos y actividades de mantenimiento en los activos más críticos (Fracttal, 2024).
7. **Seleccionar estrategias de mantenimiento:** Elige las estrategias de mantenimiento adecuadas para cada activo, basándote en su criticidad y los modos de fallo identificados, determinando si se optará por mantenimiento preventivo, basado en condiciones o un enfoque reactivo.
8. **Documentar los procedimientos de mantenimiento:** Registra de manera clara los procedimientos e instrucciones necesarias para llevar a cabo las tareas de mantenimiento, incluyendo descripciones detalladas de los pasos, herramientas, equipos y frecuencias recomendadas (Fracttal, 2024).
9. **Asignar recursos adecuados para el mantenimiento:** Destina los recursos humanos, financieros y materiales necesarios para ejecutar las actividades de mantenimiento de manera efectiva. Asegúrate de contar con personal capacitado, herramientas apropiadas y un presupuesto suficiente (Fracttal, 2024).
10. **Establecer indicadores clave de rendimiento (KPIs):** Identifica y define KPIs para monitorear y evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento implementadas, como el tiempo medio entre fallos, la disponibilidad de activos y los costos de mantenimiento (Fracttal, 2024).
11. **Implementar un sistema de seguimiento y mejora continua:** Crea un sistema para monitorear el rendimiento de las actividades de mantenimiento utilizando un CMMS/GMAO. Recopila datos, analiza tendencias y proporciona

retroalimentación para optimizar continuamente las estrategias y prácticas de mantenimiento (Fractal, 2024).

Cada paso del proceso se basa en el anterior, formando una visión integral de los riesgos asociados a cada equipo. Esta información se utiliza para desarrollar un plan de mantenimiento optimizado que minimice el tiempo de inactividad y prolongue la vida útil del activo o equipo.

- **Beneficios del RCM**

La implementación del RCM en la gestión de equipos dentro de una empresa ofrece múltiples beneficios. A continuación, se presentan tres de las ventajas más relevantes.

1. **Mejora de la seguridad:** El RCM contribuye a mejorar la seguridad al disminuir la probabilidad de incidentes graves. También asegura que todos los componentes relacionados con la seguridad estén correctamente instalados, mantenidos y monitoreados para detectar cualquier anomalía que pueda provocar daños. Esta estrategia promueve el mantenimiento preventivo, lo que permite identificar riesgos potenciales en etapas tempranas, antes de que se conviertan en amenazas para la seguridad (Fractal, 2024).

La maquinaria que opera por debajo de su rendimiento óptimo no solo genera mayores costos operativos, sino que también puede representar un riesgo para la seguridad. Las fallas repentinas en equipos pesados pueden poner en peligro al personal que trabaja en sus proximidades. Además, la falta de una planificación adecuada del mantenimiento puede aumentar la peligrosidad al momento de ejecutar reparaciones o tareas de mantenimiento preventivo (Fractal, 2024).

2. **Reducción de costos de mantenimiento:** El RCM permite reducir los costos de mantenimiento mediante un enfoque proactivo que evita reparaciones

costosas e innecesarias. Al priorizar los componentes más críticos, disminuye la carga laboral y optimiza el uso de los técnicos. Además, facilita la supervisión remota mediante sensores, reduciendo las inspecciones manuales y sus costos asociados. También contribuye a una mayor eficiencia operativa al aprovechar mejor los recursos existentes. Un plan bien estructurado disminuye el inventario de repuestos, ya que los equipos operan por más tiempo sin interrupciones. El uso de materiales y técnicas avanzadas incrementa la durabilidad de las piezas, reduciendo su sustitución. Finalmente, al mejorar el diseño del sistema y seleccionar adecuadamente los repuestos, se prolonga la vida útil de los equipos y se minimizan los gastos de reparación a largo plazo (Fractal, 2024).

- 3. Prolongación del ciclo de vida de los activos:** Al extender la vida útil de los equipos, el RCM ayuda a evitar o retrasar los costos de sustitución. Este enfoque se centra en un mantenimiento proactivo y preventivo que considera todo el sistema de componentes para identificar problemas y fuentes de fallos antes de que ocurran. Al monitorear activamente el rendimiento de un activo, se pueden detectar rápidamente signos de desgaste o problemas potenciales, permitiendo abordarlos antes de que se conviertan en situaciones graves (Fractal, 2024). Además, el RCM permite establecer planes de mantenimiento proactivos en lugar de reactivos, lo que reduce la cantidad de reparaciones necesarias a lo largo del tiempo. Como resultado, los activos pueden durar más debido a la menor presión a la que se ven sometidos y a la reducción de stock de piezas que necesitan ser reemplazadas o reparadas prematuramente (Fractal, 2024).

Es importante tener en cuenta que para aplicar eficazmente el RCM en la industria actual, tiene que ir acompañado de un software especializado que ayude con la gestión del mantenimiento, debido a que la gestión de grandes volúmenes de información que requiere esta metodología no es viable solo con documentos físicos o Excel.

2.1.2. Software de gestión de mantenimiento

El aumento de la automatización y la reducción de inventarios en las diferentes industrias han aumentado la presión sobre los sistemas de mantenimiento, se sabe que cualquier interrupción en los flujos de producción se vuelve costosa y crítica. Esto hace que la función de mantenimiento sea relevante para la gestión de operaciones, con el fin de mantener la productividad y la rentabilidad de las organizaciones a largo plazo (Durán, 2011). Este tipo de software son herramientas claves que permiten a las organizaciones planificar, ejecutar y controlar las actividades de mantenimiento de manera más eficiente. Estos sistemas facilitan la programación de tareas, el seguimiento del estado de los equipos y la gestión de inventarios, lo que contribuye a una mejor toma de decisiones y a la optimización de recursos.

2.1.2.1. Ventajas del uso de software de gestión de mantenimiento

El uso de software de gestión de mantenimiento ofrece numerosas ventajas que impactan positivamente en la eficiencia operativa y la reducción de costos. Algunas de las ventajas del uso se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4.
Ventajas del uso de software de gestión de mantenimiento

Ventaja	Descripción
Mejora en la planificación	Permite una programación más efectiva de las tareas de mantenimiento, lo que reduce el tiempo de inactividad y optimiza la utilización de los recursos disponibles.
Acceso a datos en tiempo real	Proporcionan información en tiempo real sobre el estado de los equipos, permitiendo a los responsables tomar decisiones informadas y oportunas. Esto contribuye a una mayor agilidad en la respuesta a problemas emergentes.
Optimización de costos	Al facilitar la planificación y el seguimiento de las actividades de mantenimiento, el software ayuda a reducir los costos asociados con fallos inesperados y paradas no programadas, esto se traduce en un uso más eficiente del presupuesto destinado a mantenimiento.
Documentación y seguimiento	Permite llevar un registro detallado de todas las actividades de mantenimiento realizadas, ello facilita el análisis de tendencias y la identificación de áreas de mejora. Esta documentación es valiosa para auditorías y planificación futura.
Integración con otras funciones	Muchos sistemas de gestión de mantenimiento se integran con otras funciones empresariales, como la gestión de inventarios y la contabilidad, lo que permite una visión más completa y coherente de las operaciones de la organización.

Existen varios tipos de software de gestión de mantenimiento, cada uno adaptado a diferentes necesidades y escalas de operación, entre los más comunes incluyen:

2.1.2.2. Gestión de mantenimiento asistida por computadora

Denominado también como CMMS por sus siglas en inglés de *Computerized Maintenance Management System*. Es una solución de software diseñada para optimizar las operaciones de mantenimiento dentro de una organización. Ofrece funciones como la programación de tareas de mantenimiento preventivo, el seguimiento de órdenes de trabajo, la gestión de inventario y repuestos, el monitoreo del rendimiento del equipo y la generación de informes. Al centralizar los datos de mantenimiento y automatizar procesos, el CMMS ayuda a las empresas a mejorar la confiabilidad del equipo, minimizar el tiempo de inactividad, prolongar la vida útil de los activos y optimizar los recursos de mantenimiento (Durán, 2011).

La selección y análisis de un CMMS representa un proceso altamente complejo, debido a diversos factores como: (1) la enorme cantidad de productos de software disponibles en el mercado; (2) los continuos avances y mejoras en las tecnologías de la información (TI); (3) la existencia de incompatibilidades entre los distintos sistemas de hardware y software; (4) las diferencias funcionales entre los distintos paquetes de software resulta una tarea complicada; (5) los usuarios carecen de los conocimientos técnicos y la experiencia necesarios para tomar decisiones sobre la selección de software (Durán, 2011).

Todos los sistemas CMMS permiten gestionar tanto el inventario de equipos como las órdenes de trabajo. Cada actividad relacionada con los dispositivos utilizados en un área debe ser registrada en los módulos correspondientes a órdenes de trabajo. Tanto las tareas de mantenimiento preventivo como las de mantenimiento correctivo se documentan con el fin de realizar un seguimiento efectivo de las intervenciones ejecutadas sobre los equipos. A partir del inventario de activos y los datos registrados

en las órdenes de trabajo, el CMMS brinda al personal de gestión tecnológica una valiosa fuente de información para optimizar sus funciones de soporte (Cohen, Baretich, & Gentles, 2020). Entre los beneficios que ofrece se incluyen los siguientes:

- a) Se pueden realizar evaluaciones cuantitativas de fiabilidad, basadas en tasa de fallos, el tiempo de inactividad y costos de reparación y mantenimiento, estas evaluaciones permiten decidir qué equipos reemplazar y apoyar la selección del proveedor del nuevo producto (Cohen, Baretich, & Gentles, 2020).
- b) Permite identificar las necesidades de formación de usuarios/operadores en función de las tendencias en los problemas de errores de uso (Cohen, Baretich, & Gentles, 2020).
- c) El mantenimiento programado puede priorizarse en función de las necesidades de mantenimiento del dispositivo. Los CMMS pueden utilizarse para optimizar la carga de trabajo que a menudo son elevadas (Cohen, Baretich, & Gentles, 2020).
- d) La efectividad del programa de mantenimiento programado se puede medir por la tasa de problemas identificados (rendimiento), piezas reemplazadas y equipos no encontrados/no disponibles, en comparación con el número total de inspecciones realizadas (Cohen, Baretich, & Gentles, 2020).

El sistema de gestión de equipos se sustenta en tres componentes clave como el inventario de equipos, el control de órdenes de trabajo y el historial de mantenimiento. El inventario consiste en un registro automatizado de todos los activos gestionados dentro del CMMS. Por su parte, el historial centralizado documenta cada intervención de reparación o mantenimiento realizada, sin importar quién la haya solicitado o ejecutado. El módulo de control de órdenes de trabajo permite asignar y priorizar tareas, programar inspecciones periódicas y mantenimiento preventivo, así como supervisar el

avance y estado de las órdenes, tanto planificadas como imprevistas (Cohen, Baretich, & Gentles, 2020).

2.1.2.3. Fracttal One

Es un software inteligente de gestión del mantenimiento basado en la nube, diseñado para empresas de distintos tamaños, además, permite un control integral de las operaciones de mantenimiento, combinando movilidad, interoperabilidad y eficiencia operativa. Este sistema digitaliza y planifica tareas y órdenes de trabajo (OTs), optimizando la ejecución de los planes de mantenimiento mediante una plataforma intuitiva y automatizada (ComparaSoftware, 2025).

Fracttal One facilita la creación de paneles e informes personalizados para el seguimiento de indicadores clave (KPIs), costos, activos, operaciones y solicitudes de mantenimiento. Integra múltiples sistemas y tecnologías, lo que potencia la colaboración, la gestión eficiente de datos, la flexibilidad operativa y la reducción de costos. Además, incorpora funcionalidades avanzadas de inteligencia artificial y *Machine Learning*, lo que permite generar modelos predictivos y pronosticar la confiabilidad futura de los activos. Todos los procesos relacionados con el mantenimiento están contemplados en sus diversos módulos, consolidándose como un CMMS (ComparaSoftware, 2025). Su interfaz principal se presenta en forma de dashboard con un resumen de los datos más relevantes para la gestión del mantenimiento, aunque también ofrece acceso a estadísticas más detalladas. Entre sus módulos se incluyen herramientas para análisis técnico, económico y de solicitudes, lo que permite una gestión estratégica y basada en datos (ComparaSoftware, 2025).

Entre los principales objetivos de Fracttal One están mejorar la gestión del mantenimiento de los equipos dentro de la organización, reducir los costos asociados a estas actividades, incrementar la productividad operativa, disminuir los gastos por reparaciones, y optimizar el uso de los recursos humanos, especialmente del personal de mantenimiento (ComparaSoftware, 2025).

Entre las herramientas de este software de mantenimiento se tienen los siguientes:

- a) **Dashboard:** el panel principal del dashboard permite filtrar información clave según fechas y ubicación de los activos, ofreciendo una vista rápida de los eventos ocurridos en un momento y lugar específicos. Este panel actúa como una herramienta de inteligencia de negocio, facilitando el monitoreo de actividades pasadas, actuales y futuras, así como el seguimiento de indicadores como cumplimiento de tareas, fallas y paradas de equipo, además, esta funcionalidad resulta especialmente útil cuando se dispone de poco tiempo para evaluar la gestión del mantenimiento (ComparaSoftware, 2025).
- b) **Carga de activos:** se realiza de forma sencilla y rápida en pocos pasos. El sistema utiliza una estructura jerárquica en forma de árbol invertido, lo que permite al usuario registrar los activos desde el nivel más general hasta el más específico. El proceso comienza con las unidades geográficas más amplias y continúa hasta detallar cada equipo individualmente. Esta funcionalidad es altamente intuitiva, y a nivel de cada equipo es posible registrar toda la información técnica necesaria. Además, el sistema permite personalizar los campos según las necesidades de la organización, incluyendo datos como ubicación, nombre, imagen, fecha de adquisición, código QR, fabricante, modelo y número de serie, así como adjuntar manuales, documentos, videos, historial de mantenimiento, horas de operación, estado actual, clasificación del activo, costos asociados, repuestos y más (ComparaSoftware, 2025).
- c) **Recursos humanos:** Una de las funcionalidades destacadas de este software de gestión de mantenimiento es su módulo para la carga y gestión del personal. A través de este, es posible asignar OTs detallando información clave como fechas, horarios, responsables, objetivos y tareas específicas. Además, Fractal One es compatible con otros sistemas de recursos humanos, lo que

permite integrar datos automáticamente y optimizar el proceso, reduciendo el tiempo de carga manual. Una vez registradas las fichas del personal, estas pueden organizarse y clasificarse según los criterios que el usuario defina. Una característica especialmente útil de este módulo es la posibilidad de generar y asociar firmas digitales para cada miembro del equipo, lo que permite validar formalmente su participación en las OTs. Adicionalmente, cada trabajador puede registrar las horas dedicadas a cada orden de trabajo, lo que facilita el seguimiento preciso de la ejecución y el control del rendimiento operativo (ComparaSoftware, 2025).

- d) Creación de plan de mantenimiento:** una vez ingresados los datos activos y recursos humanos, se inicia la planificación del mantenimiento mediante la creación de OTs, configuración de automatizaciones y definición de flujos de trabajo, según los datos de entrada disponibles. Una de las ventajas destacadas de Fractal One es su capacidad de asistencia inteligente: gracias a ello, el software puede sugerir planes de mantenimiento habituales y proporcionar ejemplos predefinidos. Estos pueden ser seleccionados y cargados automáticamente, incluyendo todas las tareas, responsables y recursos necesarios para su ejecución eficiente (ComparaSoftware, 2025).
- e) Almacenes:** incorpora módulos que lo consolidan como una solución completa e integral para la gestión del mantenimiento. A diferencia de muchas plataformas similares, este software incluye un módulo avanzado de gestión de almacenes, comparable en funcionalidad a un sistema especializado de control logístico. A través de esta herramienta, es posible registrar y administrar los activos ubicados en los distintos almacenes definidos por el usuario. Este módulo permite gestionar múltiples almacenes de forma independiente, controlar inventarios con ítems serializados, monitorear el stock en tiempo real y registrar existencias negativas si es necesario. Además, facilita la generación automática de órdenes de compra basadas en los niveles de inventario,

mantiene un historial detallado de movimientos y permite actualizar el estado actual de cada activo (por ejemplo, asignado, transferido, en devolución, entre otros), lo que proporciona una trazabilidad completa de los recursos materiales (ComparaSoftware, 2025).

- f) **Tipos de mantenimientos gestionados:** el software integra herramientas que minimizan el mantenimiento correctivo y fortalecen el mantenimiento preventivo y predictivo. Mediante monitoreo continuo y análisis de datos históricos y en tiempo real, permite automatizar órdenes de trabajo y optimizar la planificación con decisiones basadas en información precisa (ComparaSoftware, 2025).

2.1.2.4. Systems Applications and Products in Data Processing (SAP)

SAP se fundó en 1972 con el propósito de desarrollar un software empresarial estándar que integrara todos los procesos de negocio y permitiera el procesamiento de datos en tiempo real. Desde sus inicios, la empresa trabajó estrechamente con sus clientes para adaptar sus soluciones a las necesidades reales del entorno empresarial. En 1973, SAP lanzó su primer sistema financiero, el RF, que dio origen a SAP R/1. Posteriormente, desarrolló SAP R/2 y, en 1992, presentó SAP R/3, basado en arquitectura cliente-servidor, lo que facilitó su expansión global (SAP SE, 2025; Stross, 2024).

Con la llegada de Internet, SAP adaptó su estrategia mediante mysap.com en 1999 y diversificó sus servicios hacia mercados emergentes como la tecnología móvil, las bases de datos y la nube, mediante adquisiciones estratégicas. En 2011, lanzó SAP HANA, una base de datos en memoria capaz de procesar grandes volúmenes de datos en segundos. En 2015, presentó SAP S/4HANA, diseñado exclusivamente para esta plataforma (SAP SE, 2025; Stross, 2024). Hoy en día, SAP ofrece soluciones en la nube altamente integradas y escalables. Su plataforma SAP Business Technology Platform combina analítica, inteligencia artificial, integración y desarrollo de aplicaciones.

Actualmente, cuenta con 269 millones de usuarios en la nube, más de 100 soluciones empresariales y opera 57 centros de datos en 32 ubicaciones y 15 países (Stross, 2024).

SAP es una plataforma ERP (*Enterprise Resource Planning*) ampliamente utilizada para integrar la gestión de los procesos empresariales y facilitar la toma de decisiones estratégicas. Su rendimiento ha sido validado en escenarios como procesos logísticos, integración de filiales y coordinación entre empresas del mismo rubro. Este sistema permite administrar recursos humanos, financieros, logísticos y productivos, entre otros. A diferencia de los modelos tradicionales con bases de datos descentralizadas, SAP centraliza la información, reduciendo duplicaciones, errores y costos de almacenamiento. Su enfoque integrado mejora el acceso a la información entre áreas funcionales y promueve una mayor eficiencia operativa. SAP ofrece soluciones para empresas de todos los tamaños, proporcionando herramientas para contabilidad, finanzas, operaciones, marketing y logística. Además, ayuda a las organizaciones a enfrentar los desafíos del entorno competitivo, cumplir normativas legales y fomentar la innovación y mejora continua en los procesos empresariales (Jiménez & Muñoz, 2006).

En el software SAP cuenta con diferentes módulos, estos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5.
Principales módulos del sistema SAP y sus funciones

Módulo SAP	Función principal	Descripción
Finanzas (FI) o Contabilidad	Gestión financiera y contable	Administra operaciones económicas y permite acceder en tiempo real a la información financiera para una mejor toma de decisiones.
Gestión de Costos (CO) o Contabilidad de costo	Análisis y planificación de costos	Organiza y analiza los costos mediante estructuras como centros de costo y clases de costo, facilitando evaluaciones de eficiencia.
Ventas y distribución (SD):	Gestión de ventas y servicios	Controla todo el proceso de ventas, desde pedidos hasta la entrega, facturación y seguimiento de clientes.
Gestión de materiales (MM):	Aprovisionamiento e inventario	Administra la compra, almacenaje y traslado de materiales, manteniendo el control del stock disponible.

Planificación de Producción (PP)	Planificación y control de la producción	Optimiza la fabricación mediante la planificación de demanda y capacidad, garantizando entregas a tiempo.
Modulo HCM: (Human Capital Management)	Administración de recursos humanos	Gestiona procesos de RRHH como nóminas, evaluación del desempeño y desarrollo del personal. También se le conoce como SAP HRMS o SAP <i>Human Resource</i> (HR).
Mantenimiento de planta (PM)	Supervisión y mantenimiento de maquinaria	Implementa planes de mantenimiento preventivo y predictivo para evitar fallas y paradas no programadas.
Business One (B1)	Atención al cliente	Gestiona reclamos, consultas y seguimiento de tareas en la atención al cliente.
Gestión de proyectos (PS)	Planificación y control de proyectos	Estructura, ejecuta y controla proyectos, consolidando costos e ingresos a lo largo de su ciclo de vida.

Nota/Fuente. Jiménez & Muñoz, 2006, Stross, 2024

2.1.3. Planta concentradora de minerales

La extracción de minerales valiosos depende de las características del yacimiento y factores como seguridad, tecnología y economía. Se realiza mediante operaciones unitarias mineras, divididas en rotura de roca (perforación y voladura) y manejo de materiales (excavación y transporte) (Sbárbaro & del Villar, 2010). Las rocas son materiales frágiles y heterogéneos, esta última característica se debe a diversos factores como la composición mineral, tamaño, forma y resistencia del grano, también a la porosidad y las microfisuras causadas por la voladura. En consecuencia, la materia prima extraída de una mina suele ser muy variable (Sbárbaro & del Villar, 2010).

La roca que puede ser procesada de manera rentable se denomina mena. Para extraer los minerales que contienen el metal valioso de la mena, es necesario aplicar una serie de operaciones de separación, conocidas como procesamiento o beneficio de minerales. El objetivo principal de una planta de procesamiento es incrementar, de forma económicamente viable, la concentración de minerales valiosos, haciendo rentable el posterior proceso de extracción de metales (Sbárbaro & del Villar, 2010). Una planta de concentración o concentradora de minerales consta de varias unidades donde se llevan a cabo las operaciones de trituración o chancado, molienda, separación por flotación, deshidratación, entre otras. Algunas de estas operaciones unitarias se detallan a continuación:

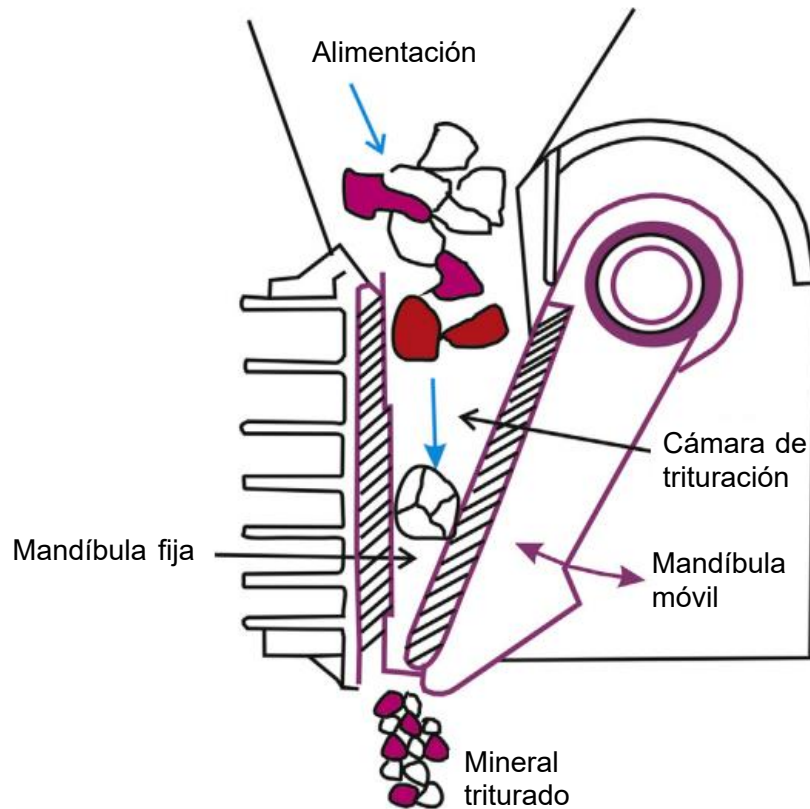
2.1.3.1. Trituración o chancado

Esta es la primera operación unitaria tras la fragmentación inicial proporcionada por la voladura subterránea o a atajo abierto. Los mecanismos de reducción de tamaño se basan en la compresión lenta de partículas grandes contra superficies rígidas. El chancado se lleva a cabo en varias etapas, reduciendo progresivamente el tamaño del material, según la relación entre el tamaño máximo de entrada y el de salida del producto. La trituración suele ser un proceso en seco y se lleva a cabo en sucesión de dos o tres etapas, mediante trituradoras primarias, secundarias y terciarias (Haldar, 2018; Sbárbaro & del Villar, 2010).

a) Trituradora primaria

Son máquinas robustas y de alta resistencia que se utilizan para triturar mineral bruto de tamaño aproximado de 1,5 m. Estos minerales de gran tamaño se reducen en la etapa de trituración primaria para obtener un producto de salida de 10 a 20 cm de dimensión. Las trituradoras primarias comunes son de mandíbulas y giratorias (Haldar, 2018). La trituradora de mandíbulas reduce el tamaño de las rocas grandes dejándolas caer en una boca en forma de "V" en la parte superior de la cámara de trituración. Esta se crea entre una mandíbula rígida fija y una mandíbula móvil pivotante dispuestas en ángulos agudos entre sí. La compresión se produce al presionar la roca contra una placa fija dentro de la cámara de trituración. La abertura inferior entre las mandíbulas se regula según el tamaño final deseado. Las rocas permanecen atrapadas entre ambas placas hasta alcanzar un tamaño que les permite pasar por dicha abertura, continuando su reducción en la trituradora secundaria (Haldar, 2018). El esquema de una trituradora primaria se aprecia en la Figura 1.

Figura 1.
Diagrama esquemático de una trituradora de mandíbulas primaria



Nota/Fuente. Haldar, 2018

b) Trituradora secundaria

Esta trituradora se emplea principalmente para procesar el material proveniente de la trituradora primaria. El mineral triturado, con un diámetro aproximado de 15 cm, se almacena y luego se descarga como producto final, con un tamaño que varía entre 0,5 y 2 cm, adecuado para la etapa de molienda. Las trituradoras secundarias son más livianas y compactas, y suelen operar con material seco y limpio, libre de impurezas como fragmentos metálicos, madera o arcilla, los cuales se eliminan durante la trituración primaria (Haldar, 2018).

Las trituradoras secundarias más utilizadas incluyen las de cono, rodillos e impacto. La trituradora de cono se asemeja a la giratoria empleado en el triturado primario, aunque se diferencia por tener un husillo más corto y una superficie de trituración de mayor diámetro en proporción a su altura. A diferencia de la giratoria, su

husillo no está suspendido. El cono interno realiza un movimiento excéntrico similar al de la trituradora giratoria. Además, una trituradora de cono puede funcionar como trituradora terciaria si se integra en un circuito cerrado entre la etapa secundaria y el molino de bolas (Haldar, 2018).

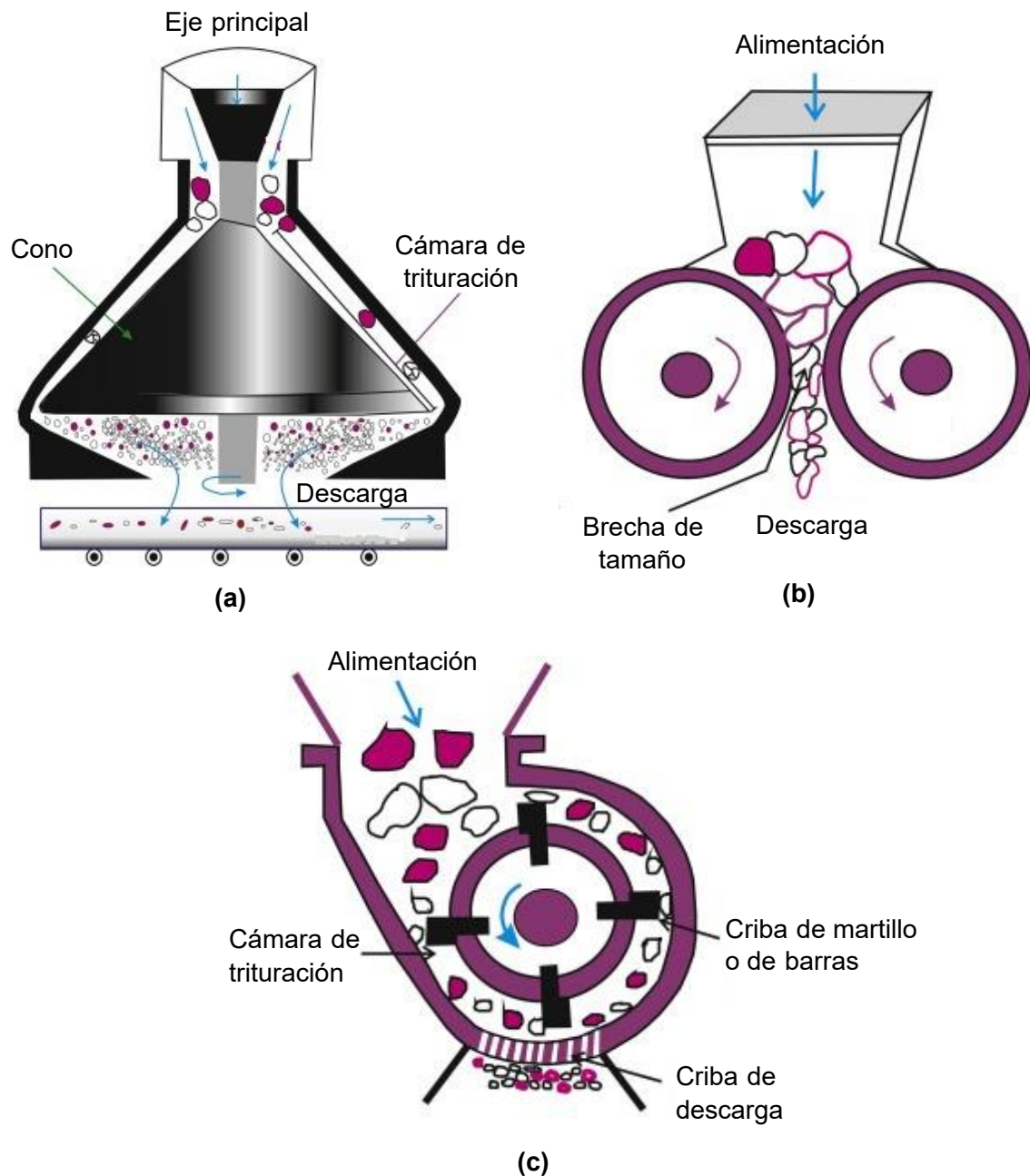
La trituradora de rodillos está compuesta por un par de rodillos cilíndricos horizontales de acero al manganeso que giran en direcciones opuestas. El material de alimentación es comprimido y triturado al pasar entre ellos, saliendo finalmente por la abertura de descarga. Este equipo se emplea comúnmente en procesos de trituración secundaria o terciaria. Las versiones más avanzadas cuentan con un cilindro giratorio que opera frente a una superficie fija o contra otro elemento giratorio con diferente diámetro y velocidad, lo que mejora la liberación de los minerales contenidos en el producto. Son especialmente utilizadas en la trituración de materiales blandos y friables como piedra caliza, carbón, fosfato y tiza (Haldar, 2018).

La trituradora de impacto tritura el material mediante golpes bruscos en lugar de compresión o abrasión. Utiliza martillos metálicos pesados o barras fijadas a los bordes de discos giratorios horizontales, los cuales son hechos de acero al manganeso o hierro fundido con carburo de cromo. Los martillos golpean repetidamente el material contra una superficie sólida y rugosa, reduciendo su tamaño. Las partículas finas pasan por una rejilla de descarga, mientras que las más grandes se reciclan hasta alcanzar el tamaño deseado. Este equipo se utiliza principalmente en procesos de trituración secundaria o terciaria. Es común en la industria de canteras de piedra para producir astillas destinadas a la construcción de carreteras y otras infraestructuras, gracias a su capacidad de generar productos de tamaño uniforme de forma eficiente (Haldar, 2018).

El diagrama esquemático de las trituradoras de cono, rodillos e impacto se muestran en la Figura 2.

Figura 2.

Diagrama esquemático de trituradoras secundarias: (a) de cono; (b) de rodillos y (c) de impacto



Nota/Fuente. Haldar, 2018

c) Trituradora terciaria

Si la reducción de tamaño no se logra completamente en la trituración secundaria, ya sea por la extrema dureza del mineral o por requerimientos específicos que exigen minimizar la generación de finos, se recomienda realizar una re trituración terciaria. Para ello, se emplean nuevamente trituradoras secundarias dispuestas en un

circuito cerrado. El material que sobrepasa la criba de la trituradora secundaria se almacena en un silo y luego se transfiere a la trituradora terciaria a través de una cinta transportadora dentro del mismo circuito cerrado (Haldar, 2018).

2.1.3.2. Molienda

En esta operación, el mineral previamente triturado se somete a reducción de tamaño dentro de recipientes cilíndricos giratorios de acero de alta resistencia, ya sea en seco o en suspensión acuosa. Los molinos más utilizados son los de tambor y de torre, donde la molienda ocurre por impacto, astillamiento y abrasión generados por el medio de molienda, ya sea de bolas, barras o partículas grandes. En la molienda primaria se emplean molinos de barras, autógenos o semiautógenos, según el tipo de medio usado. Las etapas secundarias y, en raras ocasiones, terciarias, se realizan comúnmente con molinos de bolas, aunque estos también pueden usarse en la molienda primaria. El producto final pasa por hidrociclones o clasificadores mecánicos, que separan el material fino que continúa al proceso de separación, y el material grueso, que retorna al molino. La eficiencia de molienda depende del tamaño, cantidad, movimiento y disposición del medio de molienda. Existen tipos de molinos, entre ellos, se tiene al de bolas, de barras, de guijarros, autógenos y semiautógenos. Las principales diferencias entre estos molinos son la relación entre el diámetro y la longitud del cilindro y el tipo de medio de molienda empleado (Haldar, 2018; Sbárbaro & del Villar, 2010).

a) Molino de bolas

Son equipos de molienda de forma cilíndrica corta, con una relación de longitud a diámetro de 1,5 a 1 o menor. Si esta relación está entre 3 y 5, se denominan molinos tubulares. Utilizan bolas de acero aleado o de alto carbono como medio de molienda. Están diseñados para recibir partículas con tamaños entre 20 y 25 mm. La reducción de tamaño ocurre cuando las bolas, impulsadas por la rotación del molino, se elevan y caen sobre las partículas de mineral en la parte inferior de la pulpa, generando impacto. A

mayores velocidades, las bolas alcanzan alturas más grandes, lo que incrementa la fuerza del impacto. Este tipo de molino es ideal para la molienda fina de materiales duros y gruesos, siendo especialmente eficiente en el procesamiento de minerales como los metales base y el fosfato. Su funcionamiento se da normalmente en circuito cerrado con las celdas de flotación, mejorando la eficiencia del proceso (Haldar, 2018).

b) Molino de barras

Los molinos de barras son equipos cilíndricos de gran longitud, cuya carcasa suele ser entre 1,5 y 2,5 veces mayor que su diámetro. Utilizan barras de acero como medio de trituración, las cuales generan fricción y atrición contra las partículas de mineral mediante el movimiento giratorio del tambor. Durante la operación, las barras se desplazan en forma de cascada, manteniéndose relativamente paralelas entre sí, lo que ayuda a evitar la molienda excesiva de materiales más blandos. La descarga del producto puede realizarse mediante sistemas central, periférico o por rebose. Son especialmente adecuados para preparar el material de alimentación destinado a procesos de concentración por gravedad o separación magnética (Haldar, 2018).

c) Molino de guijarros

Estos molinos son similares a los de bolas, con la diferencia de que utilizan guijarros o rocas de tamaño compacto, cuidadosamente seleccionados, como medio de molienda. El tambor giratorio genera fricción y atrición entre los guijarros y las partículas de mineral, favoreciendo la reducción del tamaño. Los guijarros son generalmente de cuarzo o cuarcita. Este tipo de molinos se destacan por su bajo costo operativo, puesto que requieren menos medios de molienda, consumen poca energía y demandan menor mantenimiento. Debido a estas ventajas, tienen una amplia aplicación en la industria minera, especialmente en el procesamiento de minerales auríferos (Haldar, 2018).

d) Molino autógeno

Estos molinos pulverizan el mineral mediante automolienda, sin requerir medios de trituración externos. El tambor suele tener un diámetro grande en relación con su longitud, generalmente en una proporción de 2 o 2,5 a 1. Durante la rotación, las partículas de mayor tamaño son lanzadas en un movimiento de cascada, generando fractura por impacto, mientras que las partículas más pequeñas se reducen por compresión. Estos molinos se emplean comúnmente en grandes plantas de procesamiento de minerales debido a su eficiencia operativa. No obstante, cuando la dureza y abrasividad del mineral varían significativamente, el rendimiento de la molienda puede volverse irregular o menos eficiente (Haldar, 2018).

e) Molino semiautógeno

Son una variante de los molinos autógenos que incorporan bolas de acero como complemento al medio de molienda natural. Esta adición permite superar la variabilidad en la eficiencia de molienda característica de los molinos autógenos puros. El contenido de bolas en estos equipos suele representar entre el 5 % y el 15 % del volumen total del molino. Actualmente, muchas plantas utilizan molinos semiautógenos como etapa de molienda primaria, en combinación con molinos de bolas para etapas posteriores. Esta configuración contribuye a reducir los costos asociados a los medios de molienda y al reemplazo de barras. Además, los molinos semiautógenos destacan por su bajo costo de mantenimiento, y son ampliamente utilizados en la molienda de minerales como oro, cobre, platino, plomo, zinc, plata, alúmina y níquel (Haldar, 2018).

2.1.3.3. Separación por flotación

En la separación por flotación, el circuito suele estar compuesto por varios subcircuitos o secciones, cada una con un objetivo específico. Cada sección está formada por una serie de celdas tipo tanque interconectadas o por bancos de celdas convencionales, en las cuales se lleva a cabo el proceso de flotación. Los relaves

generados en la primera celda alimentan a la siguiente, y este flujo continúa secuencialmente a través del banco. El relave final del banco puede enviarse a otro banco o sección para su posterior procesamiento, o ser descartado hacia el estanque de relaves. Generalmente, el concentrado de cada celda dentro de un banco o sección se recolecta en un concentrado global, el cual puede ser dirigido a una sección siguiente para continuar con el procesamiento, o, si se trata del producto final, enviado a la etapa de deshidratación (Haldar, 2018).

En algunos casos, el circuito de flotación incorpora etapas adicionales como remolienda o espesamiento. La remolienda es necesaria cuando se separan minerales con distribuciones de tamaño óptimo muy diferentes, o cuando la ley del concentrado no alcanza los niveles requeridos debido a la presencia de ganga en partículas no liberadas. Los espesadores pueden emplearse para incrementar el contenido de sólidos de la pulpa. Previo a la flotación, las pulpas deben acondicionarse en un tanque agitado, conocido como acondicionador, donde se añaden los reactivos químicos adecuados. Según las necesidades del proceso, pueden realizarse más adiciones de reactivos en otras etapas del circuito (Haldar, 2018).

2.1.3.4. Deshidratación

Dependiendo del grado de eliminación de agua requerido, en los procesos de deshidratación pueden incluir una o más de las etapas de espesamiento (hasta un 65% de sólidos), filtración (hasta un 93%) y secado (hasta un 99%). Los espesadores son equipos de sedimentación continua ampliamente utilizados en la industria minera. Su función es aumentar la concentración de sólidos en los concentrados minerales, así como recuperar el agua de los relaves de flotación para su reutilización. Su objetivo es obtener un desbordamiento limpio y una descarga con alta concentración de sólidos. Para mejorar el rendimiento, se emplean floculantes, que aglomeran las partículas finas, aceleran la sedimentación y mejoran la claridad del agua recuperada. Los floculantes sintéticos han optimizado significativamente la eficiencia del proceso (Haldar, 2018).

Cuando se requiere una reducción adicional del contenido de humedad, especialmente en concentrados, se aplica la filtración. En esta etapa, el lodo proveniente del espesador se hace pasar por una membrana (de tela, cerámica u otro material), que retiene las partículas sólidas y permite el paso del líquido. Los filtros pueden operar de forma continua (como los de banda, tambor o disco al vacío) o en ciclos (como los de placa y marco a presión), descargando los sólidos a intervalos regulares. Finalmente, el secado térmico de la torta filtrada se realiza en secadores rotatorios, mediante aire caliente generado por petróleo o gas. Esta operación se emplea ocasionalmente en el procesamiento de metales base (Haldar, 2018).

2.2. Marco conceptual

Criticidad: Es una medida relativa de las consecuencias de una falla. Una evaluación de criticidad incluye el análisis cuantitativo de eventos y fallas, y su clasificación según la gravedad de sus consecuencias (Saarinen, Sander, & Westerlund, 2013).

Depósito mineral: Volumen de roca en el que se concentra un mineral de valor económico presente o potencial en un grado y extensión suficientes para distinguirlo claramente de la roca circundante, que normalmente no tiene valor económico previsible (Daemen, 2003).

Ganga: Roca estéril o estéril. Minerales sin valor económico, asociados y entremezclados con minerales metalíferos de valor económico en la mayoría de los yacimientos de mena metálica (Daemen, 2003).

Mena: Mineral del que se extrae un metal, tal y como se encuentra en el yacimiento (Diccionario de la lengua española, 2024a).

Software: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora (Diccionario de la lengua española, 2024b).

CAPÍTULO III.

Desarrollo del trabajo de investigación

Este capítulo aborda los principales equipos de una planta concentradora de minerales, el análisis de su criticidad, la gestión del mantenimiento y el desarrollo de planes de mantenimiento preventivo.

3.1. Equipos de planta concentradora

La Planta Concentradora de la unidad minera Yauliyacu cuenta con equipos destinados a diversas operaciones unitarias, tales como chancado primario, secundario y terciario; molienda primaria, secundaria y remolienda; flotación bulk y de zinc; además de sistemas para la preparación de cal y reactivos, circuito de relaves, recirculación y tratamiento de aguas. La lista detallada de estos equipos se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6.
Listado general de equipos de planta concentradora de minerales

EQUIPOS CHANCADO PRIMARIO	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Apron Feeder N° 01	PL.FT.3615.001	FAMIA INDUSTRIAL		15/440/870
Apron Feeder N° 02	PL.FT.3615.002			15/440/1745
Apron Feeder N° 03	PL.FT.3615.003			12/440/1745
Faja transportadora N°01	PL.FT.3630.001	FENNER-DUNLOP	EP 800/4	50/460/1185
Grizzly Vibratorio			PAMZER	25/440/1800
Chancadora de Quijadas C-100	90.015.280.308	METSO	C-100	150/440/1200
Extractor de polvos N°01	PL.EP.05.5.001	KT PERU	C-480 MPI-1	10/440/1760
Extractor de polvos N°02	PL.EP.05.5.001	KT PERU	C-480 MPI-1	10/440/1760
Extractor de polvos N°03				10/440/1800
Monoriel eléctrico Yale 5TN		YALE		3.7/460/3600
EQUIPOS CHANCADO SECUNDARIO Y TERCIARIO	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Faja transportadora N°02	PL.FT.3082.001			30/460/1180
Faja transportadora N°03	PL.FT.3610.001			50/440/1775
Faja transportadora N°04	PL.FT.3688.001			50/440/1190
Faja transportadora N°05	PL.FT.3023.001			50/440/1190
Zaranda vibratoria N°01		SANDVIK	LF1850D	15/440/1800
Zaranda vibratoria N°02	PL.ZA.6X16.002	TYCAN	T-1100	40/440/1800
Zaranda vibratoria N°03	PL.ZA.6X16.003	TYCAN	T-1100	40/440/1800
Chancadora N°02	PL.CH.0055.001	SYMONS		200/440/890
Chancadora N°03	PL.CH.05.5.003	SYMONS		200/440/890
Chancadora N°04	PL.CH.05.5.004	SYMONS		200/440/890
Puente grúa Demag 10TN	PL.PG.10TM.001	DEMAG		18/380/1800

EQUIPOS MOLIENTA PRIMARIA	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Faja transportadora N°06	PL.FT.3613.001			20/460/1175
Faja transportadora N°07	PL.FT.3628.001			12.5/440/1755
Alimentador de finos N°01	PL.FT.3006.005			10/440/1175
Alimentador de finos N°02	PL.FT.3006.002			12/440/1175
Alimentador de finos N°03	PL.FT.3006.003			10/440/1175
Alimentador de finos N°04	PL.FT.3006.004			12/440/1200
Molido de barras Nordberg 13' X 20'	PL.MO.1320.001	NORDBERG	13' X 20'	1500/4000/180
Bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01	PL.BP.10X8.001	WARMAN	ASH 200 MCC	200/460/1785
Bomba centrífuga ASH-200 MCC N°02	PL.BP.10X8.002	WARMAN	ASH 200 MCC	200/460/1785
Compresora de aire Atlas Copco GA-90 N°01		ATLAS COPCO	GA-90	125/460/1800
Compresora de aire Atlas Copco GA-90 N°02		ATLAS COPCO	GA-90	125/460/1800
Puente grúa Demag 25 TN	PL.PG.25TM.001	DEMAG		18/380/1800
Puente grúa P&H 40 TN	PL.PG.40TM.001	P & H		50/440/1200
EQUIPOS MOLIENTA SECUNDARIA Y REMOLIENTA	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Molino de bolas Marcy 12' X 13'	PL.MO.1213.001	MARCY	12' X 13'	1500/4000/150
Molino de bolas Comesa 8' x 6'	PL.MO.0806.001	COMESA	8' X 6'	250/2300/435
Molino de bolas Dominion 11-½'X10-½'	PL.MO.1110.001	DOMINION	11½' X 10½'	600/2300/900
Bomba Centrífuga ASH-150 MCC N°03	PL.BP.08X6.001	WARMAN	ASH 200 MCC	150/460/1785
Bomba Centrífuga ASH-150 MCC N°04	PL.BP.08X6.002	WARMAN	ASH 200 MCC	150/460/1785
Puente grúa Demag 10TN	PL.PG.10TM.002	DEMAG		10/460/1800
EQUIPOS FLOTACION BULK	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Celda de flotación OK-28 Rougher Bulk N°01	PL.CE.28RB.001	OUTOKUMPU	OK-28	75/460/1190
Celda de flotación OK-28 Rougher Bulk N°02	PL.CE.28RB.002	OUTOKUMPU	OK-28	75/460/1190
Celda de flotación OK-28 Scavenger Bulk N°03	PL.CE.28SB.001	OUTOKUMPU	OK-28	75/440/1185
Celda de flotación OK-28 Scavenger Bulk N°04	PL.CE.28SB.002	OUTOKUMPU	OK-28	60/440/1185
Celda de flotación OK-28 Scavenger Bulk N°05	PL.CE.28SB.003	OUTOKUMPU	OK-28	75/160/119
Banco celdas agitair 48" Bulk 1ra cleaner	PL.CE.481B.001	AGITAIR		15/440/1200
Banco celdas Denver SubA-21 Bulk 2da y 3era cleaner	PL.CE.482B.001	AGITAIR		20/440/1200
Bomba centrífuga Espiasa 4"x3" N°11	PL.BP.08X6.001	WILFLEY	5K - 8" x 6"	30/460/1745
Bomba centrífuga Espiasa 4"x3" N°12	PL.BP.08X6.002	WILFLEY	5K - 8" x 6"	100/460/1785
Bomba centrífuga Espiasa 4"x3"N°16	PL.BP.04X2.003	WILFLEY	2K - 4" x 2"	20/460/1765
Bomba centrífuga Espiasa 3" X 2" N°15		ESPIASA	3" X 2"	30/440/1165
EQUIPOS FLOTACION ZINC	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Celda de flotación OK-28 Rougher Zn N°01	PL.CE.28RZ.001	OUTOKUMPU	OK-28	75/440/1185
Celda de flotación OK-28 Rougher Zn N°02	PL.CE.28RZ.002	OUTOKUMPU	OK-28	75/460/1190
Celda de flotación OK-28 Scavenger Zn N°03	PL.CE.28SZ.001	OUTOKUMPU	OK-28	75/440/1185
Celda de flotación OK-28 Scavenger Zn N°04	PL.CE.28SZ.002	OUTOKUMPU	OK-28	75/480/1185
Celda de flotación OK-28 Scavenger Zn N°05	PL.CE.28SZ.003	OUTOKUMPU	OK-28	60/440/1165
Celda de flotación Svedala RCS-50	PL.CE.0RCS.001	SVEDALA	RCS-50	125/440/1200
Banco celdas agitair 48" Zn 1ra cleaner	PL.CE.481Z.001	AGITAIR		20/460/1200
Banco celdas agitair 48" Zn 2da cleaner	PL.CE.482Z.001	AGITAIR		20/460/1200
Banco celdas agitair 48" Zn 3ra cleaner	PL.CE.483Z.001	AGITAIR		20/460/1200
Acondicionador de Zn N°01	PL.TK.1010.001			60/460/1785
Acondicionador de Zn N°02				60/460/1785
Bomba centrífuga Warman 10" X 10" N°05		WARMAN		100/460/1200
Bomba centrífuga ASH-150 8" X 6" N° 06		WARMAN	ASH-150	150/460/1800
Bomba centrífuga Wilfley 4K N°22	PL.BP.004C.002	WILFLEY	4K - 6" x 4"	40/440/1770
Bomba centrífuga Wilfley 4K N°23	PL.BP.06X4.002	WILFLEY	4K - 6" x 4"	50/440/1770
Bomba centrífuga Wilfley 5K N°24	PL.BP.08X6.004	WILFLEY	5K - 8" x 6"	60/440/1760
Bomba centrífuga Wilfley 5K N°25	PL.BP.08X6.005	WILFLEY	5K - 8" x 6"	60/440/1760
Soplador Spencer 7500CFM - 5PSI N°01	PL.SP.0200.001	SPENCER	C62R1614	200/460/3576
Soplador Spencer 7500CFM - 5PSI N°02	PL.SP.0250.001	SPENCER	C64614	250/460/3576

EQUIPOS PLANTA CAL Y REACTIVOS	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Molino de bolas Comesa 4' x 6'		COMESA		60/460/1790
Faja transportadora de Cal				3/440/1800
Bomba de transferencia de Cal		ESPIASA	4" X 3"	15/460/1785
Puente grúa R&M de 2.5 TN		R&M		5/480/3600
Bomba Loop de cal N°01		ESPIASA	4" X 3"	20/460/1175
Bomba Loop de cal N°02		WILFLEY	4K	15/440/1175
Tanque preparación sulfato de cobre				15/440/1200
Tanque preparación de cianuro N°01				15/440/1800
Tanque preparación de cianuro N°02				10/460/1800
Tanque preparación de floculante N°01				12/440/1800
Tanque recepción de floculante N°01				
Tanque preparación de Xantato				5/460/1800
Tanque acondicionador de Cal N°01				12/440/900
Tanque acondicionador de Cal N°02				15/440/1200

EQUIPOS CIRCUITO DE RELAVES	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Espesador de relaves 45' x 8'	PL.ES.45X8.001			10/440/1800
Clarificador de relaves 25' x 8'				2/440/1800
Bomba centrífuga Metso HR-200 N°01		METSO	HR-200	125/460/1785
Bomba centrífuga HM-150 Metso N°02	FHC-S	METSO	HM-150	100/460/1785
Bomba de relaves Wirth TPM 8" x 10" N°01	PL.BP.8X10.001	WIRTH	TPM 8 'x 10'	800/2300/1185
Bomba de relaves Wirth TPM 8" x 10" N°02	PL.BP.8X10.002	WIRTH	TPM 8 'x 10'	700/2300/1190
Bomba de relaves Wirth TPM 8" x 10" N°03		WIRTH	TPM 8 'x 10'	800/2300/1185
Bomba centrífuga Wilfley 5K PC N°01	PL.BP.08X6.012	WILFLEY	5K - 8" x 6"	100/440/1200
Bomba centrífuga Wilfley 5K PC N°02	PL.BP.08X6.013	WILFLEY	5K - 8" x 6"	100/460/1800
Bomba Allis Chalmers 8" x 6" N°01	PL.BP.AC86.001	ALLIS CHALMERS	SRL-C - 8" x 6"	60/460/1190
Bomba Allis Chalmers 8" x 6" N°02	PL.BP.AC86.002	ALLIS CHALMERS	SRL-C - 8" x 6"	50/440/1180
Bomba de drenes E05Q N°01 (Subdrenaje - Chinchán)		HIDROSTAL	E05Q	25/460/1200
Bomba de drenes E05Q N°02 (Subdrenaje - Chinchán)		HIDROSTAL	E05Q	25/460/1200
Bomba de drenes E05Q N°03 (Subdrenaje - Chinchán)		HIDROSTAL	E05Q	25/460/1200
Bomba de drenes E05Q N°04 (Subdrenaje - Chinchán)		HIDROSTAL	E05Q	25/460/1200
Bomba de drenes 125-400 N°01 (Espejo - Chinchán)		HIDROSTAL		25/460/1200
Bomba de espejo 125-400 N°02 (Espejo - Chinchán)		HIDROSTAL		50/440/1800
Bomba de espejo 125-250 N°03 (Espejo - Chinchán)		HIDROSTAL		50/440/1800
Tubería de relaves				
Compresora de aire Kaeser SK-20 N°01				20/460/3600
Puente grúa Demag de 7.5 TN		DEMAG		9.5/460/1800

EQUIPOS RECIRCULACION Y TRATAMIENTO DE AGUAS	CODIGO	MARCA	MODELO	MOTOR ELEC. HP/V/RPM
Bomba centrífuga Hidrostral 65-250 N°03				75/440/3600
Bomba centrífuga Svedala HR-150 N°02				60/440/1790
Bomba centrífuga Hidrostral 125-400 N°01		HIDROSTAL	125-400	200/460/1800
Bomba centrífuga Hidrostral 125-400 N°02		HIDROSTAL	125-400	200/460/1800
Tanque planta de tratamiento NCD N°01		TATUNG CO	WH0204JFB C	20/460/1760
Tanque planta de tratamiento NCD N°02		TATUNG CO	WH0404JFB C	40/460/1770
Tanque planta de tratamiento NCD N°03		TATUNG CO	WH0404JFB C	40/460/1770
Tanque planta de tratamiento ED N°01		FABTECH		10/460/1750
Tanque planta de tratamiento ED N°02		FABTECH		10/460/1750
Tanque planta de tratamiento ED N°03		FABTECH		10/460/1750
Tanque planta de tratamiento ED N°04		FABTECH		10/460/1750
Tanque planta de tratamiento ED N°05		FABTECH		10/460/1750
Clarificador de agua 50' x 10'		FABTECH		7.5/440/1800

Para el desarrollo de los objetivos específicos, se tomó como caso de estudio la bomba centrífuga ASH 200 MCC N°01 de la marca Warman, utilizada en la operación unitaria de molienda primaria. Este equipo fue considerado crítico para evitar paradas en planta, ya que requería intervenciones aproximadamente cada 19 a 20 días.

3.2. Identificación de los equipos críticos de la planta concentradora de minerales según enfoque RCM

La identificación de los equipos críticos en una planta concentradora de minerales se realizó aplicando el enfoque RCM, un enfoque estructurado que permite definir el tipo de mantenimiento más apropiado según la función del equipo, los modos de falla y sus posibles consecuencias (Mobley, 2002). El análisis de criticidad para la bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01 se realizó como se detalla a continuación:

1. Definición de funciones primaria y secundarias

a) Función primaria

Bombear pulpa de mineral desde la salida del molino primario hasta los hidrociclones D-20.

b) Funciones secundarias

- Contener la pulpa sin fugas (sellado adecuado).
- Operar con eficiencia energética.
- Resistir la abrasión/corrosión del flujo de pulpa.

2. Identificación de modos de falla

Para la bomba ASH-200, los modos de falla típicos son:

a) Falla hidráulica

- Reducción de caudal/presión por desgaste del impulsor y/o cavitación.

b) Falla mecánica

- Rotura de sello mecánico (fugas).
- Desgaste acelerado de los forros e impulsor por abrasión.
- Vibraciones excesivas debido a un desbalanceo o mal alineamiento.

c) Falla eléctrica

- Sobrecalentamiento y excesiva vibración del motor eléctrico.

3. Análisis de consecuencias de cada modo de falla

Aplicando la metodología RCM para clasificar las fallas según su impacto, se obtuvo la clasificación de consecuencias para la bomba ASH 200 MCC N°01, como se muestra en la Tabla 7. Las siglas empleadas son: OC (Operacional), que indica afectación a la producción y los costos; HS (*Health/Safety*), que representa riesgos para la seguridad y salud de las personas; EN (*Environmental*), que señala un impacto ambiental; y NO (No Oculta), correspondiente a fallas que no generan consecuencias significativas.

Tabla 7.
Clasificación de consecuencias de la de la bomba centrífuga ASH-200 MCC, según RCM

Modo de Falla	Consecuencia	Tipo (Según RCM)
Fuga por rotura de sello	Parada no planificada más contaminación	Operacional (OC) o Seguridad (HS)
Desgaste de impulsor	Caudal insuficiente, pérdida de producción	Operacional (OC)
Desgaste prematuro de forros	Fuga masiva de carga, daño a otros equipos	Ambiental (EN) o Seguridad (HS)
Falla del motor	Parada total	Operacional (OC)

4. Evaluación de criticidad con la matriz RCM

Para evaluar la criticidad de la bomba ASH-200, se aplicó la combinación de probabilidad y consecuencias de falla, utilizando la matriz RCM que se muestra en la Tabla 8, como base para priorizar las acciones de mantenimiento.

Tabla 8.
Matriz de criticidad según RCM

Consecuencias	Probabilidad		
	Alta	Media	Baja
HS/EN (Grave)	Crítico	Alto	Medio
OC (Costoso)	Alto	Medio	Bajo
NO (Sin impacto)	Bajo	Bajo	Mínimo

3.3. Definición de las actividades de mantenimiento preventivo

Una vez identificada la bomba centrífuga ASH-200 MCC como equipo crítico, se procedió a establecer sus actividades de mantenimiento preventivo. Para ello, se consideraron las recomendaciones del fabricante, el manual técnico del equipo, así como la experiencia operativa del personal técnico con amplio conocimiento del funcionamiento de esta bomba.

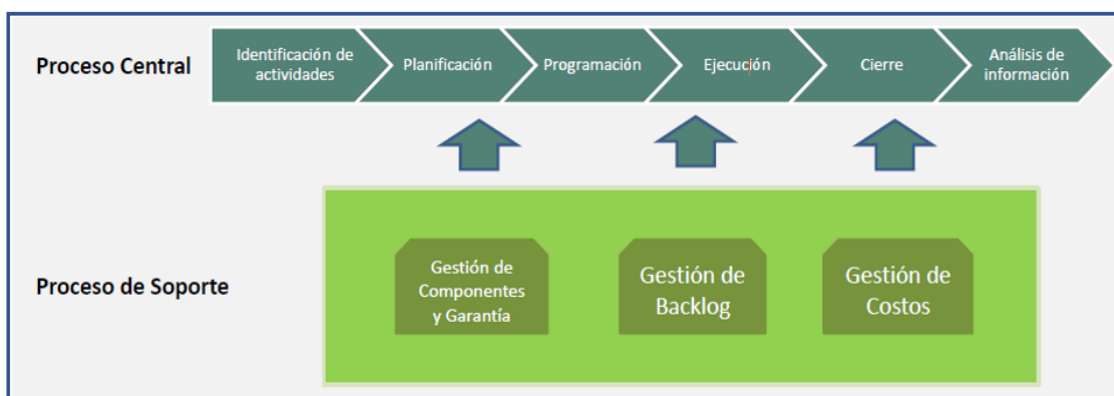
3.4. Implementación del módulo PM del software SAP

Para implementar el módulo SAP-PM en la generación de planes de mantenimiento, se partió del análisis del proceso central de la gestión de mantenimiento preventivo, el cual organiza las actividades desde la identificación hasta el análisis de resultados. Con esta base definida, se procedió a su estructuración dentro del sistema SAP, incorporando los elementos clave como la estrategia de mantenimiento, puntos de medida, hoja de ruta, plan de mantenimiento y lanzamiento de tomas. A continuación, se describe el proceso y su integración en SAP-PM.

3.4.1. Proceso central de mantenimiento preventivo

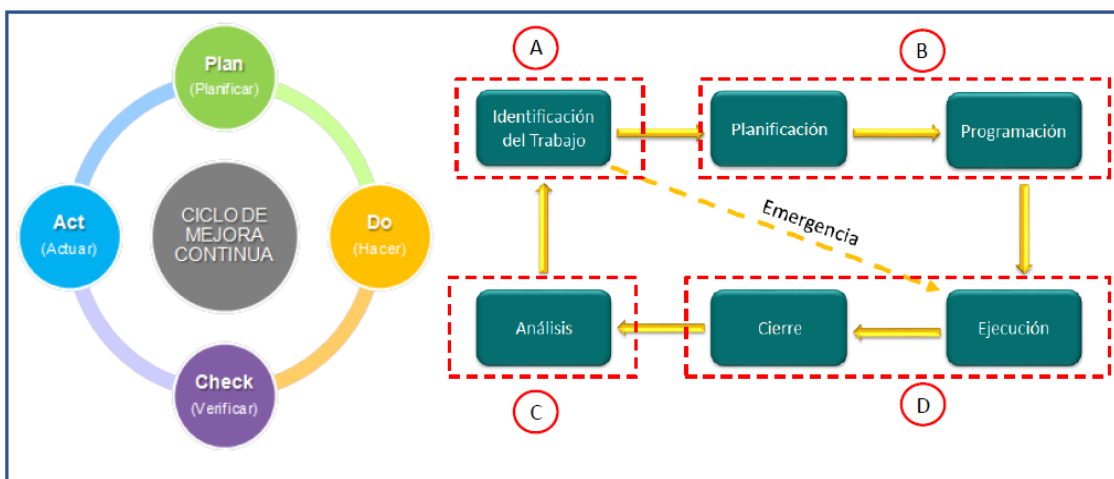
En la Unidad Minera Yauliyacu, la gestión del mantenimiento preventivo se desarrolla a través de un proceso central que contempla las siguientes etapas: a) identificación de actividades, b) planificación, c) programación, d) ejecución, e) cierre y f) análisis de información. Este proceso se complementa con un proceso de soporte que abarca la gestión de componentes y garantías, la gestión del backlog y el control de costos. La Figura 3 muestra el diagrama correspondiente a este proceso central.

Figura 3.
Diagrama de proceso central de mantenimiento preventivo



Los macro procesos de la gestión de mantenimiento están definidos siguiendo la metodología del Círculo de la Mejora Continua o también conocido como Ciclo PDCA de Edwards Deming, tal como se visualiza en la Figura 4.

Figura 4.
Ciclo de mejora continua del proceso central de mantenimiento

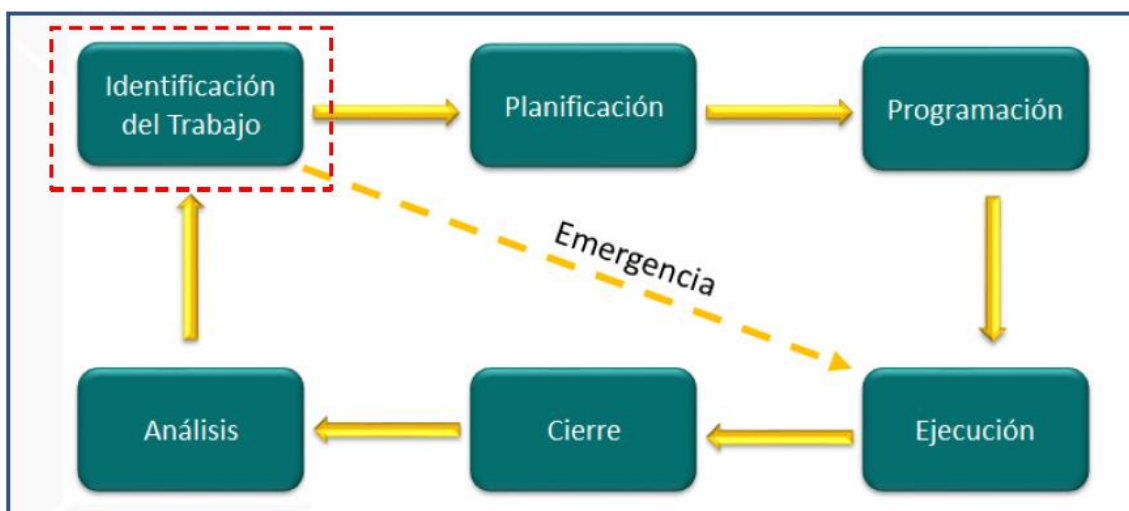


A continuación, se describirá cada componente del proceso central del mantenimiento preventivo.

a) Identificación del trabajo

Es el proceso donde se identifican todas las averías y anomalías de los equipos, así como su priorización para su atención, en coordinación con Operación Planta (Figura 5).

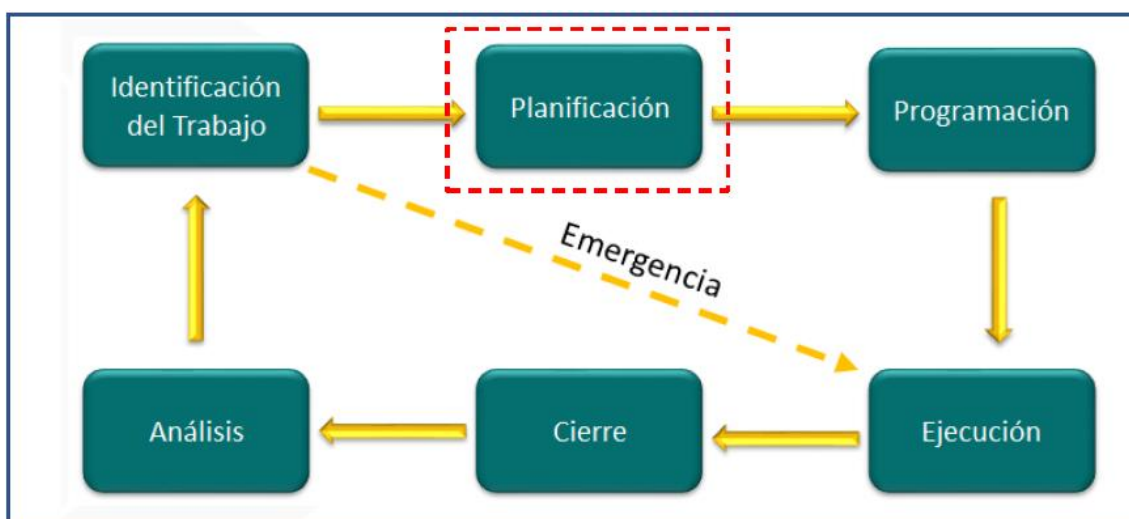
Figura 5.
Proceso de identificación del trabajo



b) Planificación

Es el proceso donde se decide con anticipación el *Qué* y *Cómo* se harán los trabajos de mantenimiento en el mediano y largo plazo, proponiendo un *Cuándo* (Figura 6).

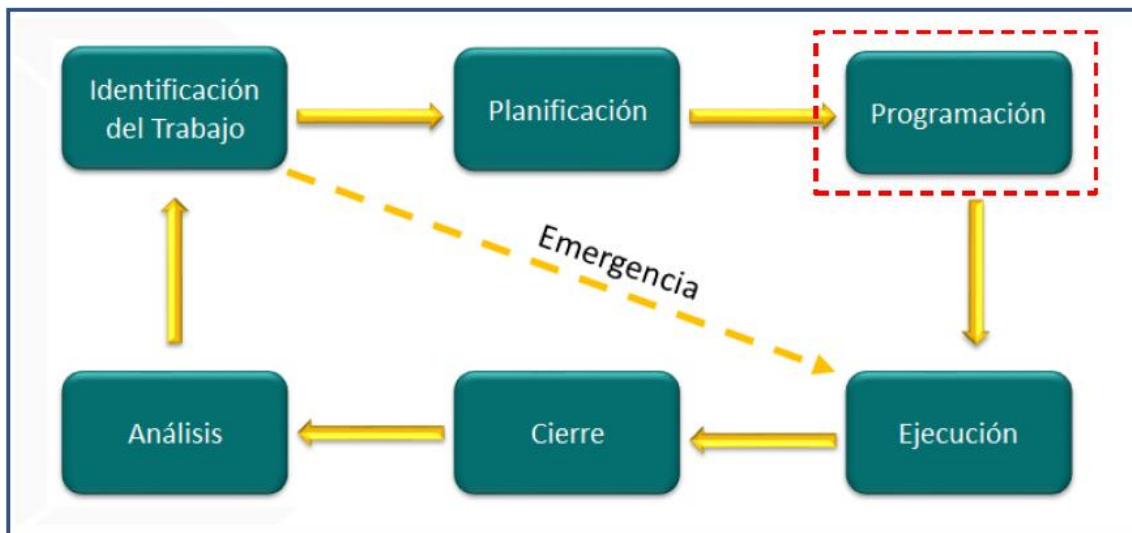
Figura 6.
Proceso de planificación



c) Programación

Es el proceso donde se decide con anticipación el *Quién* y *Cuándo* se ejecutarán los trabajos de mantenimiento (Figura 7).

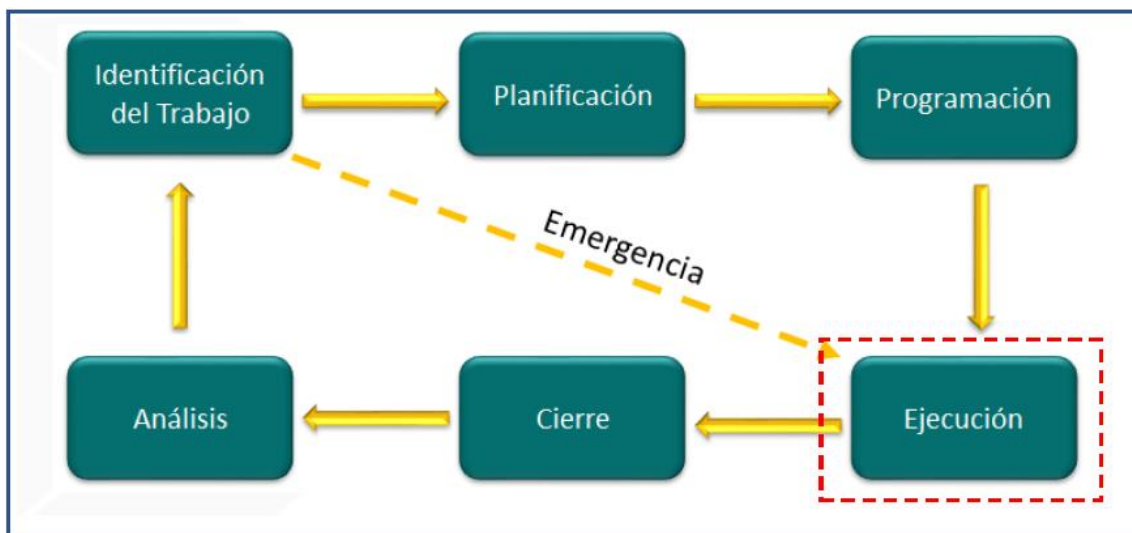
Figura 7.
Proceso de programación



d) Ejecución

Es el proceso de intervención directa del equipo para ejecutar el mantenimiento o reparación planificada y programada (Figura 8).

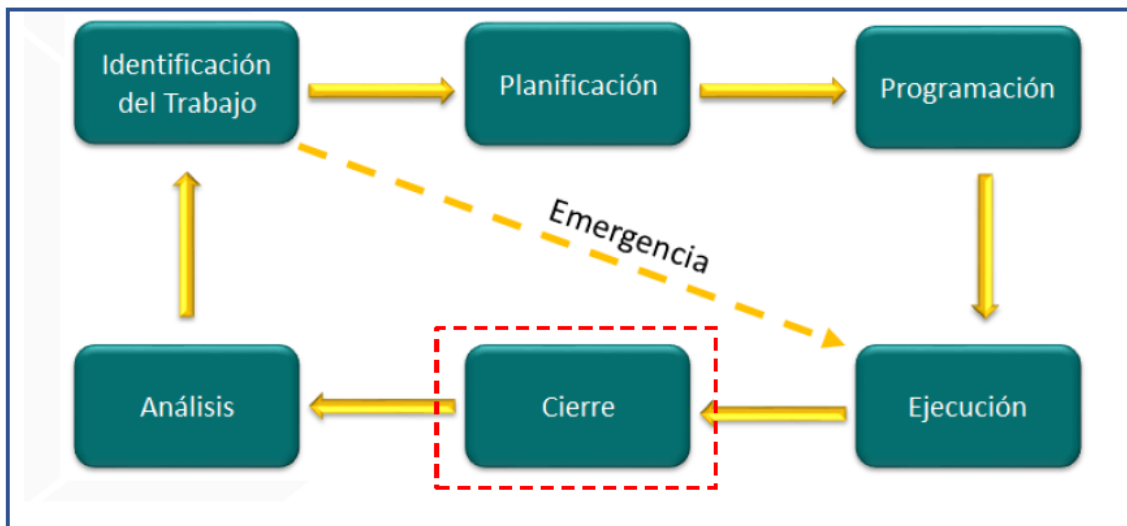
Figura 8.
Proceso de ejecución



e) Cierre

Es el proceso de registro de todas las incidencias en la ejecución del mantenimiento o reparación. Se verifica de calidad de notificaciones (Figura 9).

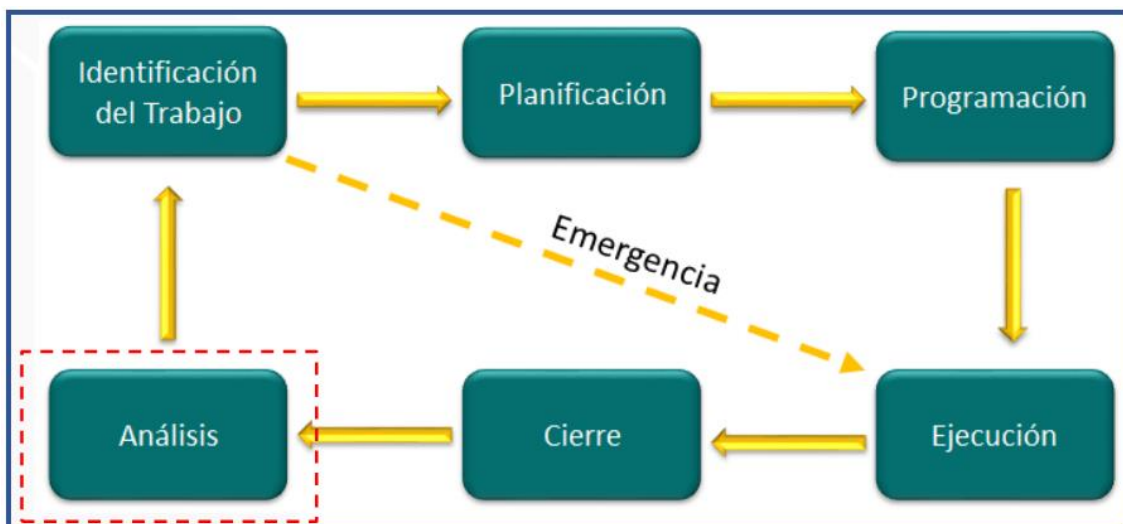
Figura 9.
Proceso de cierre



f) Análisis

Es el proceso por el cual se evalúa todos los demás procesos de gestión del mantenimiento en busca la mejora continua (Figura 10).

Figura 10.
Proceso de análisis



3.4.2. Implementación del SAP-PM

Una vez definido el proceso central de mantenimiento, se procede a digitalizar e implementar en SAP, con los siguientes pasos:

3.4.2.1. Definir la estrategia de mantenimiento en SAP

Una estrategia de mantenimiento es una estructura de trabajo que define las pautas, métodos y criterios para ejecutar actividades de mantenimiento de manera planificada y eficiente. Su objetivo es garantizar la disponibilidad de los equipos, optimizar recursos y minimizar fallos operativos. Una estrategia de mantenimiento efectiva debe incorporar ciclos de intervención para cada actividad de mantenimiento, garantizando que los trabajos se ejecuten en el momento óptimo según las necesidades específicas de cada equipo, por ejemplo, cada dos meses o cada 500 horas de funcionamiento (Mobley, 2002).

Una estrategia de mantenimiento en SAP es un plan que define cómo y cuándo se debe realizar el mantenimiento de un equipo o instalación. En lugar de programar tareas de mantenimiento de forma manual, SAP permite automatizarlas usando estrategias basadas en: tiempo (por días, meses y años); uso (horas de operación, kilómetros recorridos, ciclos de producción, entre otros); y condición (según lecturas de mediciones o inspecciones) (SAP, 2025). Entre los componentes de la estrategia de mantenimiento se tiene:

a) Encabezado de la estrategia

Este componente incluye el nombre de la estrategia y descripción.

b) Parámetros de programación

Los parámetros de programación como por ejemplo, horizonte de llamada y factor de turno, contienen los datos de programación para la estrategia de mantenimiento respectiva, con los que puede influir en la programación de los planes de mantenimiento. Cuando se crea un plan de estrategia, el sistema copia estos datos en el plan, donde se pueden modificar (SAP, 2025).

c) Indicadores de programación

Dentro de una estrategia de mantenimiento, se pueden utilizar diferentes indicadores para especificar el tipo de programación que se necesita o para definir un set de ciclos (SAP, 2025), entre ellos se tienen:

- Basado en el tiempo. Ejemplo: cada 30 días.
- Basado en el tiempo por fecha clave. Ejemplo: cada 30 días del día 30 del mes.
- Basado en el tiempo por calendario de fábrica. Ejemplo: cada 30 días laborables.
- Basado en el rendimiento: Ejemplo: cada 50 horas de funcionamiento.

d) Paquetes de mantenimiento

Las actividades de mantenimiento que deben realizarse en una fecha o momento determinado, se combinan en paquetes de mantenimiento. Estos contienen, por ejemplo, la duración del ciclo y la unidad de medida.

A continuación, se explican los pasos para crear la estrategia de mantenimiento en SAP mediante la transacción IP11, junto con el detalle de la información que debe completarse en esta etapa:

- **Nombre:** Se recomienda colocar un nombre corto o código referido al equipo al que se le creará el plan de mantenimiento. En este caso, se utilizará **MPP-HR**.
- **Descripción:** Debe ser más específica que el nombre anterior. Por ejemplo: **MANTTO PREV CON HORÓMETROS**.
- **Indicador programación:** Activado
- **Unidad de la estrategia:** Seleccionar la opción **H (horas)**.
- **Horizonte de apertura:** 80%. Este valor indica que, cuando se haya cumplido el 80% del tiempo programado (en horas), SAP generará automáticamente la orden para el siguiente mantenimiento.

- **Factor de decalaje en conclusión retrasada:** 10%
- **Tolerancia en conclusión atrasada:** 10%
- **Factor de decalaje en conclusión anticipada:** 10%
- **Tolerancia en conclusión anticipada:** 10 %

La Figura 11 muestra la pantalla inicial de la transacción IP11, y la Figura 12 el llenado de esta misma con información para la estrategia de mantenimiento.

Figura 11.
Pantalla inicial de la transacción IP11

Modificar estrategias de mantenimiento: Detalle

Estructura de diálogo

- ▼ Estrategias de mantenir
 - Paquetes

Nombre: []

Descripción: []

Indicador programación: Tmpto [v] **SecuencPaq**

Unidad de estrategia: []

Horizonte de apertura: [] %

Factor de decalaje en conclusión retrasada: [] %

Tolerancia en conclusión atrasada (%): [] %

Factor de decalaje en conclusión anticipada: [] %

Tolerancia en conclusión anticipada (%): [] %

Calendario de fábrica: []

Estadísticas

Cantidad paquetes: 0

Utilización

Figura 12.

Llenado de la transacción IP11 para la estrategia de mantenimiento.

Modificar estrategias de mantenimiento: Detalle

Estructura de diálogo

- ▼ Estrategias de mantenim
- Paquetes

Nombre: MPP-HR

Descripción: MANTTO PREV CON HOROMETROS

Indicador programación: Activ.

Unidad de estrategia: H

Horizonte de apertura: 80 %

Factor de decalaje en conclusión retrasada: 10 %

Tolerancia en conclusión atrasada (%): 10 %

Factor de decalaje en conclusión anticipada: 10 %

Tolerancia en conclusión anticipada (%): 10 %

Calendario de fábrica: ☐

Estadísticas

Cantidad paquetes: 3

Utilización

SecuencPaq

Posteriormente, dentro de la estrategia de mantenimiento, se deben modificar los paquetes de mantenimiento. Para ello, en la columna 'Estructura de diálogo' (Figura 13a), se debe seleccionar la opción 'Paquetes' y registrar la información que se muestra en la Figura 13b, la cual incluye:

- **Num:** Secuencia de los paquetes.
- **Dur. Ciclo:** Frecuencia expresada en la unidad base (horas).
- **Unidad:** Unidad base definida en los parámetros de programación.
- **Texto Ciclo:** Descripción de la tarea de mantenimiento

Figura 13.

Paquete de mantenimiento: (a) selección; y (b) registro de información

Modificar paquetes de mantenimiento

Estructura de diálogo: Estrategias de mantenin... Paquetes

Nombre: MPP-HR

Descripción: MANTTO PREV CON HOROMETROS

Indicador programación: Activ.

SecuencPaq

(a)

(b)

N...	Dur.ciclo	Un...	Texto ciclo mantenimie...	T...	J...	T...	Offset	T...	Pr...	P
1	250 H		MANTTO PREV, 250HR	A	1	A				
2	500 H		MANTTO PREV, 500HR	B	2	B				
3	7500 H		MANTTO PREV, 750HR	C	3	C				
	H									
	H									
	H									
	H									

Luego del registro de los paquetes, se debe definir la secuencia de ejecución de los mismos seleccionando el ícono *SecuencPaq*; tal como se aprecia en la Figura 14a. En esta sección, se configura el orden en que se realizarán los mantenimientos según el número de horas transcurridas. Para el ejemplo de la estrategia MPP-HR denominada MANTTO PREV CON HOROMETROS, el Paquete 1 (250HR) se ejecuta cada 250 horas (marcado como A), el Paquete 2 (500HR) se ejecuta cada 500 horas (marcado como B), y el Paquete 3 (750HR) cada 750 horas, ver Figura 14b.

Figura 14.

(a) Selección del ícono *SecuencPaq*; y (b) secuencia de paquetes creados para el plan de mantenimiento

Modificar paquetes de mantenimiento (a)

Estructura de diálogo: Estrategias de mantenin... Paquetes

Nombre: MPP-HR

Descripción: MANTTO PREV CON HOROMETROS

Indicador programación: Activ.

SecuencPaq

N...	Dur.ciclo	Un...	Texto ciclo mantenimie...	T...	J...	T...	Offset	T...	Pr...	Pr...
1	250 H		MANTTO PREV, 250HR	A	1	A				
2	500 H		MANTTO PREV, 500HR	B	2	B				
3	7500 H		MANTTO PREV, 750HR	C	3	C				
	H									

Secuencia de paquete (b)

Atrás ◀ Fechas anteriores ▶ Otras fechas

Estrategia: MPP-HR MANTTO PREV CON HOROMETROS

Paquete	Texto ciclo	250 H	500 H	750 H	1000 H	1250 H	1500 H	1750 H	2000 H	2250 H	2500 H	2750 H	3000 H	3250 H	3500 H	3750 H
1	MANTTO PREV, 250HR	A		A		A		A		A		A		A		A
2	MANTTO PREV, 500HR		B		B		B		B		B		B		B	
3	MANTTO PREV, 750HR															

3.4.2.2. Crear el punto de media

Son valores de contadores de los equipos que se registran con la finalidad de llevar un control de horas trabajadas acumuladas y proyectar sus futuras intervenciones (mantenimientos planificados) (SAP, 2025).

La creación del punto de medida en SAP se realiza mediante la transacción IK11, cuyo acceso se muestra en la Figura 15a. A continuación, se deben asignar los parámetros requeridos, como el equipo correspondiente, y marcar la casilla *Pto-medida es cont.*, tal como se aprecia en la Figura 15b

Figura 15.

Transacción IK11: (a) creación del punto de medida; y (b) asignación de parámetros

Crear punto de medida: Acceso

Obj.pto.medida Equipo

Equipo

Descripción

Tipo pto.medida Punto de medida general

☐ Pto-medida es cont.

(a)

Crear punto de medida: Acceso

Obj.pto.medida Equipo

Equipo

Descripción

Tipo pto.medida Punto de medida general

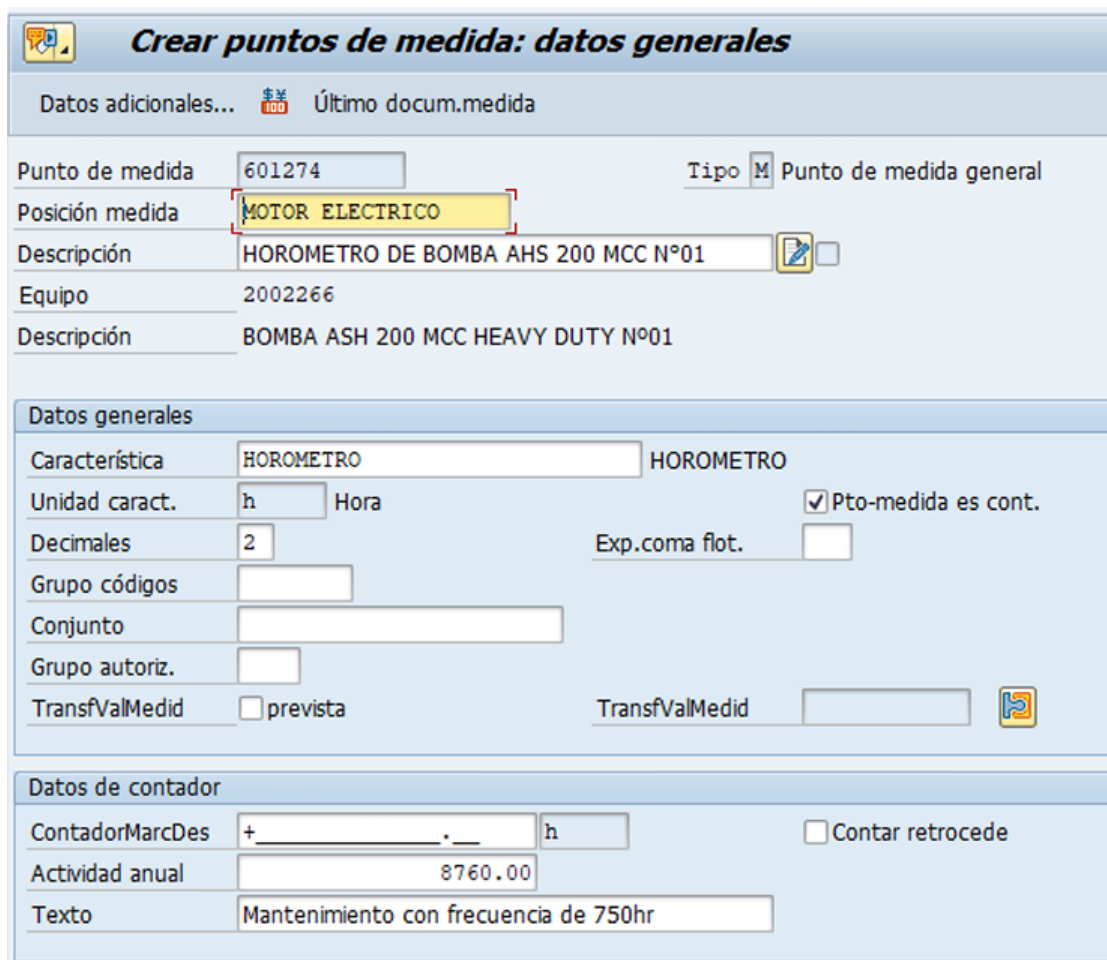
☒ Pto-medida es cont.

(b)

Luego de ejecutar la transacción IK11 presionando la tecla F8 o seleccionando el ícono correspondiente, se procede a completar los campos requeridos para la creación del punto de medida asociado al equipo. En la Figura 16 se muestra un ejemplo, donde se especifica la posición de medida, la característica (HOROMETRO), la unidad de medida (horas), y se activa la casilla *Pto-medida es cont.*, además, se define la actividad anual esperada (8760 h) y se registra una descripción en el campo de texto, como 'Mantenimiento con frecuencia de 750 h.

Figura 16.

Asignación de parámetros para la creación del punto de medida



Crear puntos de medida: datos generales

Datos adicionales... Último docum.medida

Punto de medida: 601274 Tipo: M Punto de medida general

Posición medida: MOTOR ELECTRICO

Descripción: HOROMETRO DE BOMBA AHS 200 MCC N°01

Equipo: 2002266

Descripción: BOMBA ASH 200 MCC HEAVY DUTY N°01

Datos generales

Característica: HOROMETRO HOROMETRO

Unidad caract.: h Hora ☒ Pto-medida es cont.

Decimales: 2 Exp.coma flot. ☐

Grupo códigos:

Conjunto:

Grupo autoriz.:

TransfValMedid: ☐ prevista TransfValMedid:

Datos de contador

ContadorMarcDes: + h ☐ Contar retrocede

Actividad anual: 8760.00

Texto: Mantenimiento con frecuencia de 750hr

3.4.2.3. Crear la hoja de ruta de mantenimiento

Las Hojas de Ruta son documentos donde se registran las actividades, mano de obra y repuestos a utilizar en un plan de mantenimiento planificado en base a una frecuencia establecida. Las Hojas de Ruta son un plan genérico que define actividades de mantenimiento como operaciones, materiales, duraciones y ciclos. Esta Hojas de Ruta se puede asignar a múltiples equipos, por ejemplo, Plan para "Bombas Centrífugas" que aplica a 05 bombas similares.

Para la creación de Hojas de Ruta en SAP se emplea la transacción IP05, cuya vista general se aprecia de la Figura 17.

Figura 17.

Transacción IA05. Pantalla de inicio de las creación del punto de medida

Crear instrucción: cabecera vista general

GrH Ruta 20

Grupo hojas ruta 20

Cont.grupo HRuta 1

Centro planificación ☒

Identificador ext.

Asignaciones a cabecera hoja ruta

Puesto de trabajo /

Utilización

Grupo planif.

Estado global ☒

Estado instalación

Estrategia mantenim.

Conjunto

Elemento refer.PM/PS

☐ Petición de borrado

Datos QM

Puntos de inspección

Numeración externa Numeración externa unívoca posible

A continuación, se asignan los parámetros requeridos en la transacción IA05, tales como el puesto de trabajo, la utilización, el grupo de planificación, el estado global, el estado de instalación y la estrategia de mantenimiento, como se muestra en la Figura 18.

Figura 18.

Asignación de parámetros para la creación de la Hoja de Ruta

Crear instrucción: cabecera vista general

GrHRuta B-AHS200 MANTTO PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°01

Grupo hojas ruta B-AHS200

Cont.grupo HRuta 1 MANTTO PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°01

Centro planificación 5300

Identificador ext. MANTTO PREVENTIVO FRECUENCIA 750HR

Asignaciones a cabecera hoja ruta

Puesto de trabajo TECLECT3 / 5300 TECNICO ELECTRONICO PLANTA 01

Utilización 4 Mantenimiento

Grupo planif. 203 Mina Yauliyacu

Estado global 4 Liberado (general)

Estado instalación 1 En funcionamiento

Estrategia mantenim. MPP-HR MANTTO PREV CON HOROMETROS

Conjunto

Elemento refer.PM/PS

☐ Petición de borrado

Datos QM

Puntos de inspección

Numeración externa Numeración externa unívoca posible

Una vez completados los parámetros requeridos en la Figura 18, se selecciona el ícono de *Operación* (Figura 19) para asignar distintas actividades en la Hoja de Ruta.

Figura 19.

Selección del ícono Operación

Crear instrucción: cabecera vista general

GrHRuta B-AHS200 MANTTO PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°01

Grupo hojas ruta B-AHS200

Cont.grupo HRuta 1 MANTTO PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°01

En la Figura 20 se muestra el resumen de las operaciones incluidas en la Hoja de Ruta asignadas a la bomba centrífuga AHS-200. A continuación, se deben definir las actividades prioritarias y validar que sean apropiadas para la mencionada bomba. Finalmente, se procede a asignar el paquete de mantenimiento correspondiente seleccionando el ícono *PaqManPr*, el cual se encuentra enmarcado en rojo en la misma figura.

Figura 20.
Asignación de actividades en la Hoja de Ruta

Crear instrucción: resumen operaciones													
◀ ▶ ⏮ ⏭ 🔍 📄 🔗 🏠 🔧 📊 📅 📁 📝 🔖 Propia Externo Cab. Plan													
GrHRuta B-AHS200 MANTTO PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°01 ConGrPlan 1													
🔧 PaqManPr 📊 Compte. 👤 REO 👤 MAF 🔧 PaqServ 👤 CarIns													
Resumen general operación													
Op.	SOp	PstoTbjo	Ce.	Ctrl	Descripción operación	T.	Trabajo	Un.	Nº	Dur.	Un.	C %	DistTrbInt
0010		TECMEC12	5300	PM01	Inspección de disco lado gland	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0020		TECMEC12	5300	PM01	Inspección de disco lado succión	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0030		TECMEC12	5300	PM01	Inspección de forro lado gland	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0040		TECMEC12	5300	PM01	Inspección de forro lado succión	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0050		TECMEC12	5300	PM01	Inspección de impulsor	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0060		TECMEC12	5300	PM01	Inspección de carcasa lado gland	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0070		TECMEC12	5300	PM01	Inspección de carcasa lado succión	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0080		TECMEC12	5300	PM01	Inspección de eje	☐	2	H	2	1	H	2 100	1
0090		TECMEC12	5300	PM01	Inspección del cilindro portarodamientos	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0100		TECMEC12	5300	PM01	Verificación juego del cilindro portarod	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0110		TECMEC12	5300	PM01	Lubricación de rodamientos	☐	0.4	H	2	0.2	H	2 100	1
0120		TECMEC12	5300	PM01	Limpieza general del equipo	☐	1	H	2	0.5	H	2 100	1
0130		TECELE12	5300	PM01	Lubricación de rodamientos de motor elec	☐	0.3	H	1	0.3	H	2 100	1
0140		TECELE12	5300	PM01	Reajuste de conexiones electricas	☐	0.5	H	1	0.5	H	2 100	1
0150		TECELE12	5300	PM01	Reajuste de pernos de sujeción	☐	0.3	H	1	0.3	H	2 100	1
0160		TECELE12	5300	PM01	Limpieza de tapa del ventilador	☐	0.5	H	1	0.5	H	2 100	1
0170		TECLECT3	5300	PM01		☐							
0180		TECLECT3	5300	PM01		☐							
0190		TECLECT3	5300	PM01		☐							

La asignación del paquete de mantenimiento se muestra en la Figura 21, donde se activa la casilla en la columna 'C', correspondiente al mantenimiento programado a las 750 horas, previamente creado y mostrado en la Figura 14b. Una vez seleccionado el paquete adecuado, se procede a asignar los materiales necesarios para el mantenimiento tipo C, accediendo a la opción *Compte*, resaltada en rojo.

Luego, se abre una la ventanilla denominada Resumen de componentes (Figura 22), donde se asigna los insumos y repuestos necesarios para el mantenimiento de los equipos.

Figura 21.
Asignación del paquete de mantenimiento

Cr.instrucción: Res.paquetes mantenimiento

Paquete mantenimiento preventivo Propia Externo Cab. Plan

GrHRuta B-AHS200 MANTTO PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°01 ConGrPlan 1

Compte. REO MAF CarIns

Resumen oper.paquetes mant.prev.

Op.	SOp	Descripción operación	A	B	C
0010		Inspección de disco lado gland	☐	☐	☒
0020		Inspección de disco lado succión	☐	☐	☒
0030		Inspección de forro lado gland	☐	☐	☒
0040		Inspección de forro lado succión	☐	☐	☒
0050		Inspección de impulsor	☐	☐	☒
0060		Inspección de carcaza lado gland	☐	☐	☒
0070		Inspección de carcaza lado succión	☐	☐	☒
0080		Inspección de eje	☐	☐	☒
0090		Inspección del cilindro portarodamientos	☐	☐	☒
0100		Verificación juego del cilindro portarod	☐	☐	☒
0110		Lubricacion de rodamientos	☐	☐	☒
0120		Limpieza general del equipo	☐	☐	☒
0130		Lubricacion de rodamientos de motor elec	☐	☐	☒
0140		Reajuste de conexiones electricas	☐	☐	☒
0150		Reajuste de pernos de sujeción	☐	☐	☒
0160		Limpieza de tapa del ventilador	☐	☐	☒

Figura 22.
Asignación de insumos y repuestos para el mantenimiento de la bomba

Resumen componentes

Interno Externo Operación Cabecera Hoja de ruta

GrHRuta B-AHS200 MANTTO PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°01 ConGrPlan 1

Operación 0010 Inspección de disco lado gland

Selección componente Catálogo

Asign.componentes

Material	Cantidad	UM	R	R..	Den.componente	T Conjunto	ConClasif	Pos.	I...	R...	C...
1070003554	5.000	KG	☐		TRAPO INDUSTRIAL 26CM X 19CM L		ESTÁNDAR	0000	X	☒	☐
			☐							☐	☐
			☐							☐	☐

3.4.2.4. Crear el plan de mantenimiento

Con la estrategia de mantenimiento, el punto de medida y la hoja de ruta ya definidos, se procede a crear el plan de mantenimiento preventivo para la bomba ASH-200 N°01 mediante la transacción IP01. La pantalla inicial de esta transacción se muestra en la Figura 23.

Figura 23.
Pantalla inicial de la transacción IP01.

Crear plan de mantenimiento preventivo: Plan estrategia

Plan mant.prev.

Cab.plan mant.

Ciclos plan de mantenimiento 19.11.2024 Parám.programación plan mantenimiento Datos adicionales pl...

Contador

Ciclo	Unidad	Texto ciclo mantenimiento	Offset

Posición Lista objeto posición Emplazamiento posición Ciclos posición 19.11.2024

Posición PM

Objeto de referencia

Ubic.técn.

Equipo

Conjunto

Datos de planificación

Centro planif. Grupo planif.

Clase de orden Clase actividad PM

Pto.tbjo.resp. / División

Prioridad Norma de liquidación

Doc.ventas /

Hoja de ruta para mantenimiento

Tp. GrHRuta CGrHR Descripción

La Figura 24 presenta la transacción IP01 completada, el cual, es un paso fundamental para la creación del plan de mantenimiento preventivo. Para ello, se accede

a la pestaña *Ciclos plan de mantenimiento 19.11.2024* (cuadro en rojo), donde se debe ingresar la siguiente información:

- **Plan mant.prev.:** se asigna el nombre del plan, por ejemplo, MANTT PREVENTIVO, BOMBA AHS200 N°01.
- **Contador:** se ingresa el número 601274 y se definen los ciclos de mantenimiento. Por ejemplo, un ciclo basado en el horómetro de la bomba, identificado como HORÓMETRO DE BOMBA AHS 200 MCC N°01, con una periodicidad de 7500 h y la descripción MANTT PREV, 750HR.
- **Objeto de referencia:** en esta sección se vincula el plan con el equipo correspondiente. Se detalla la Ubicación técnica (Ubic. técn.) como 5000-5301-0120-01 y el Equipo como 2002266, indicando claramente que el plan está dirigido a los EQUIPOS DE BOMBEO, en específico a la BOMBA ASH 200 MCC HEAVY DUTY N°01.
- **Datos de planificación:** en esta sección se configuran los parámetros de gestión y programación del mantenimiento, se incluye la siguiente información:
 - Centro planificador: 5300 - MINA YAULIYACU
 - Clase de orden: ZM02 - Orden de Mantenimiento Preventivo
 - Punto de trabajo responsable (Pto.tbjo.resp.): TECMECLI/5300 - TÉCNICO MECÁNICO
 - Prioridad: 3 – Media
 - Grupo planif.: YMP - Mecánico Planta
 - Clase de actividad PM: Z10 – Preventivo
 - División: S002 - Yauliyacu
- **Hoja de ruta para mantenimiento:** contiene el detalle de las operaciones que deben realizarse durante el mantenimiento. En este caso, se hace referencia a la ruta A/B-AHS200, cuya descripción es: MANTT PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°01.

Figura 24.

Asignación de parámetros para la creación del plan de mantenimiento, pestaña Ciclos plan de mantenimiento

Crear plan de mantenimiento preventivo: Plan estrategia

Plan mant.prev.

Cab.plan mant.

Parám.programación plan mantenimiento Datos adicionales pl...

Contador HOROMETRO DE BOMBA AHS 200 MCC N°01

Ciclo	Unidad	Texto ciclo mantenimiento	Offset
7500 H		MANTTO PREV, 750HR	0

Posición Lista objeto posición Emplazamiento posición Ciclos posición 19.11.2024

Posición PM

Objeto de referencia

Ubic.técn. EQUIPOS DE BOMBEO

Equipo BOMBA ASH 200 MCC HEAVY DUTY N°01

Conjunto

Datos de planificación

Centro planif. MINA YAULIYACU Grupo planif. Mecánico Planta

Clase de orden Orden de Mantto. Preventivo Clase actividad PM Preventivo

Pto.tbjo.resp. / TECNICO MECANIC... División Yauliyacu

Prioridad Norma de liquidación

Doc.ventas

Hoja de ruta para mantenimiento

Ip. GrHRuta CGrHR Descripción

/ / MANTTO PREVENTIVO BOMBA AHS-200 MCC N°...

Luego, como parte de la configuración de los parámetros de programación del plan de mantenimiento, se accede a la pestaña *Parám. programación plan mantenimiento*, tal como se ve en la Figura 25. En esta sección se completa lo siguiente:

- **Determinación de fecha**

- Factor de decisión conclusión retrasada (*Fact.dec.conclusión retr.*): Se establece en **10 %**.
- Tolerancia (+): Fijado en **10 %**. Define el margen de tolerancia positivo para la fecha de finalización.

- Factor de decisión conclusión anticipada (*Fact.dec.concl.anticipada*): Se configura en **10 %**. Similar al factor de retraso, pero para las finalizaciones tempranas.
 - Tolerancia (-): Fijado en **10 %**. Define el margen de tolerancia negativo para la fecha de finalización.
 - Factor de dilatación: Establecido en **1.00**. Este factor puede usarse para ajustar la duración de los ciclos de mantenimiento.
- **Control de orden de entrega**
 - Horizonte apertura: Se define en **80 %**. Este porcentaje indica el tiempo antes de la fecha de inicio planificada en el que se generará la orden de mantenimiento.
 - Intervalo toma: Se establece en **5 JHR**.
 - Sujeto a conclusión: casilla está marcada, esto indica que la generación de la siguiente orden de mantenimiento depende de la conclusión de la orden anterior.
- **Inicio programación**
 - *Valor inicial cont.:* está designado para introducir un valor inicial para el contador, su unidad es en horas.

Figura 25.

Asignación de parámetros en pestaña *Parám. programación plan mantenimiento*

Crear plan de mantenimiento preventivo: Plan estrategia

Plan mant.prev. 

 Cab.plan mant.

Ciclos plan de mantenimiento 19.11.2024 Parám.programación plan mantenimiento Datos adicionales pl...   

Determinación fecha		Control de orden de entrega	
Fact.dec.conclusión retr.	10 %	Horizonte apertura	80 %
Tolerancia (+)	10 %	Intervalo toma	5 JHR
Fact.dec.concl.anticipada	10 %	☒ Sujeto a conclusión	
Tolerancia (-)	10 %		
Factor de dilatación	1.00		

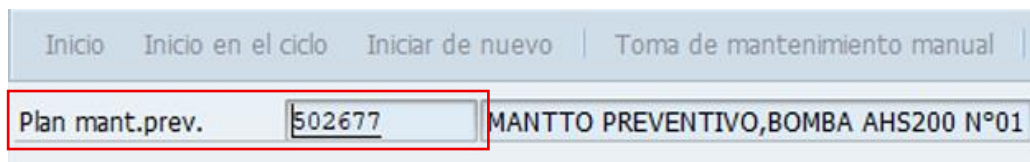
Inicio programación

Valor inicial cont. h 

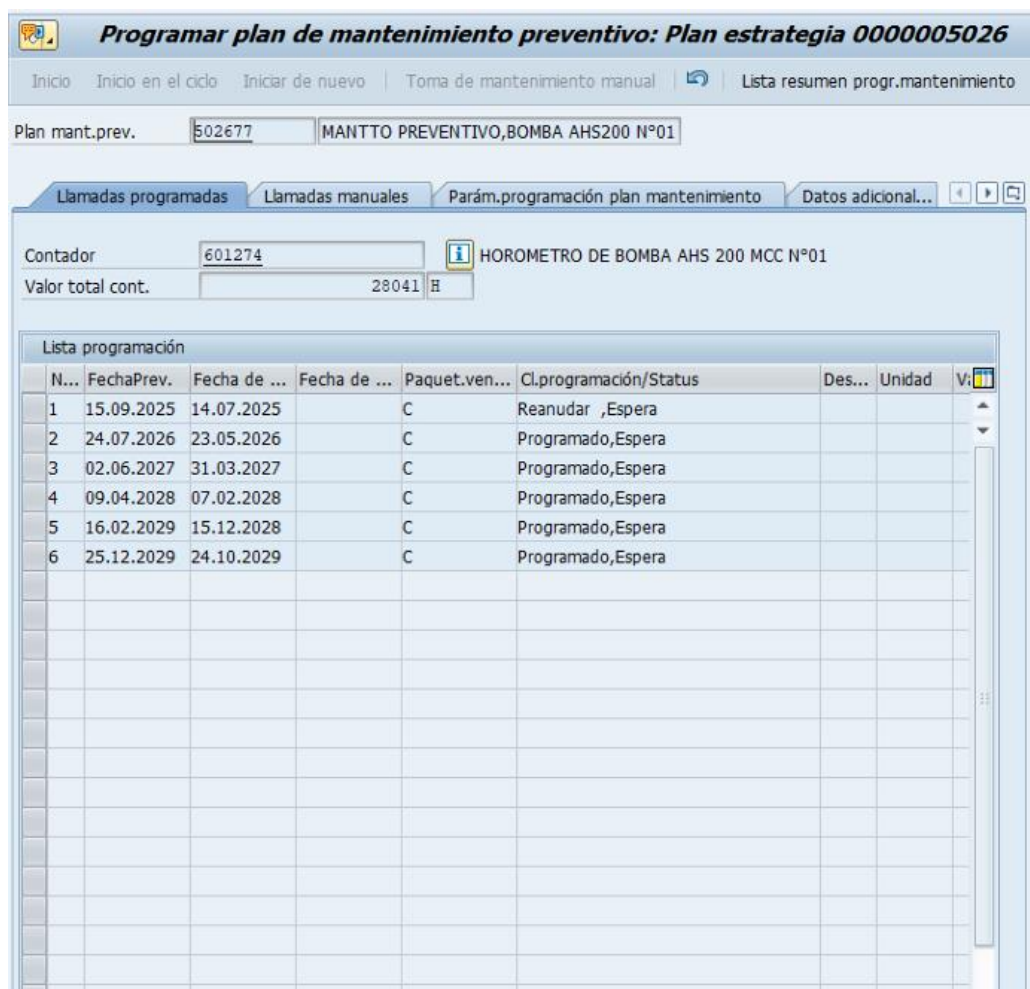
Una vez completados todos los parámetros del plan de mantenimiento, se procede a guardar la configuración, generándose así el plan de mantenimiento correspondiente para la bomba ASH-200 N°01, como se muestra en la Figura 26a. Finalmente, se debe activar o lanzar el plan generado, empleando la transacción IP10.

Figura 26.

Plan de mantenimiento preventivo 502677: (a) generado; y (b) lanzado y listo para tomar



(a)



N...	FechaPrev.	Fecha de ...	Fecha de ...	Paquet.ven...	Cl.programación/Status	Des...	Unidad	Vi
1	15.09.2025	14.07.2025		C	Reanudar ,Espera			
2	24.07.2026	23.05.2026		C	Programado,Espera			
3	02.06.2027	31.03.2027		C	Programado,Espera			
4	09.04.2028	07.02.2028		C	Programado,Espera			
5	16.02.2029	15.12.2028		C	Programado,Espera			
6	25.12.2029	24.10.2029		C	Programado,Espera			

(b)

CAPÍTULO IV.

Resultados, contrastación de hipótesis y discusión de resultados

4.1. Identificación de los equipos críticos de la planta concentradora de minerales según el enfoque RCM

Como parte del análisis realizado mediante la metodología RCM, se identificaron los modos de falla relevantes de la bomba ASH-200 MCC N°01, perteneciente a la sección de molienda primaria de la planta concentradora de minerales.

La Tabla 9 muestra los resultados del análisis RCM de la bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01, la cual, presenta dos modos de falla críticos que son la fuga de carga por el sello y la falla del motor eléctrico. Estos modos están asociados a impactos severos sobre la seguridad operativa, la salud del personal, y el rendimiento del proceso de molienda primaria, lo que justifica su clasificación como críticos y sugiere una intervención inmediata.

Por otro lado, se observa en esta misma tabla que, los modos de falla clasificados como altos son el desgaste del impulsor y el desgaste prematuro de forros, aunque estos no representan un riesgo directo para la seguridad, pueden impactar significativamente en la eficiencia y disponibilidad operativa si no se gestionan de forma proactiva. En estos casos, se recomienda una combinación de mantenimiento preventivo y rediseño, especialmente si los fallos son recurrentes o afectan la confiabilidad general del equipo, tal como se detalla en la Tabla 10.

Tabla 9.
Modos de falla y clasificación de criticidad

Modo de falla	Factores asociados	Nivel de criticidad
Fuga de carga por el sello	HS + EN + OC + Probabilidad Alta	Crítico
Desgaste de impulsor	OC + Probabilidad Alta	Alto
Desgaste prematuro de forros	EN + OC + Probabilidad Alta	Alto
Falla del motor eléctrico	HS + OC + Probabilidad Alta	Crítico

Nota. HS: Efecto sobre la salud y seguridad; EN: Impacto ambiental; OC: Impacto operativo y económico

Tabla 10.
Estrategias RCM y acciones recomendadas

Modo de Falla	Estrategia RCM	Acciones por realizar
Fuga de carga por el sello	Mantenimiento preventivo	Inspección, reajuste de sellos. Stock de sellos de repuesto.
Desgaste de impulsor	Mantenimiento preventivo	Control de su vida útil. Recubrimiento con anti-abrasión.
Desgaste prematuro de forros	Rediseño (si es recurrente)	Control de su vida útil. Evaluar material más resistente.
Falla del motor eléctrico	Mantenimiento predictivo	Monitoreo de vibración y temperatura.

En línea con los resultados de la Tabla 9, la bomba ASH-200 MCC N°01 se encuentra listada como equipo crítico dentro del inventario de molienda primaria. Su criticidad coincide con los hallazgos obtenidos mediante el enfoque RCM, validando la necesidad de priorizar su mantenimiento dentro del plan de gestión de activos. Este análisis resalta la efectividad del enfoque RCM para identificar riesgos funcionales, priorizar equipos clave y optimizar la estrategia de mantenimiento. La aplicación de esta metodología permite reducir el riesgo de fallas no planificadas, extender la vida útil de los activos y mejorar la disponibilidad operativa del sistema de molienda.

4.2. Definición de las actividades de mantenimiento preventivo

Como resultado del análisis técnico y la aplicación del enfoque RCM, se definieron las actividades de mantenimiento preventivo mediante la elaboración de la hoja de ruta para la bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01, en esta, se detalla de forma secuencial y sistemática, las operaciones necesarias para asegurar su óptimo funcionamiento y prevenir fallas recurrentes.

La Tabla 11 presenta las actividades establecidas, organizadas por número de operación, descripción de la tarea y secuencia de ejecución para la bomba ASH-200 MCC N°01. Por ejemplo, la inclusión de tareas como la inspección del impulsor (Op. 0050) y de los forros (Ops. 0030 y 0040) responde a los modos de falla relacionados con el desgaste prematuro, mientras que las labores de lubricación y reajuste eléctrico

(Ops. 0110, 0130 y 0140) están orientadas a prevenir fallas en el sistema de accionamiento, como el motor eléctrico. Estos resultados evidencian que el RCM permite identificar equipos críticos y también facilita el diseño de un plan de mantenimiento adaptado a las condiciones operativas reales de los equipos.

Tabla 11.

Hoja de ruta del mantenimiento preventivo – Bomba ASH-200 MCC N°01

Op.	Descripción de la operación
0010	Inspección de disco lado gland
0020	Inspección de disco lado succión
0030	Inspección de forro lado gland
0040	Inspección de forro lado succión
0050	Inspección de impulsor
0060	Inspección de carcasa lado gland
0070	Inspección de carcasa lado succión
0080	Inspección de eje
0090	Inspección de cilindro portarodamientos
0100	Verificación juego cilindro portarod
0110	Lubricación de rodamientos
0120	Limpieza general del e
0130	Lubricación de rodamiento de motor elec
0140	Reajuste de conexiones eléctricas
0150	Reajuste de pernos de sujeción
0160	Limpieza de tapa del ventilador

4.3. Implementación del módulo PM del software SAP

La Figura 27 muestra la pantalla del sistema SAP correspondiente al plan de mantenimiento identificado con el número 502677, denominado MANTTO PREVENTIVO, BOMBA AHS200 N°01. Este plan se encuentra asociado a la estrategia de mantenimiento codificada como 0000005026 y se basa en el horómetro del equipo, cuyo valor registrado es 28041 horas. En la sección de llamadas programadas, el sistema ha generado automáticamente una lista de actividades de mantenimiento a realizar en el futuro. Dicha lista incluye la fecha prevista, la fecha de inicio y la fecha de ejecución, el tipo de paquete a aplicar (identificado con la letra C) y el estado de programación, el cual se detalla como Programado o En espera. Este resultado confirma que la correcta configuración del plan de mantenimiento en el SAP-PM permite una planificación automática y eficiente de las tareas preventivas.

Figura 27.
Pantalla de programación del plan preventivo en SAP-PM

N...	FechaPrev.	Fecha de ...	Fecha de ...	Paquet.ven...	Cl.programación/Status	Des...	Unidad	V...
1	15.09.2025	14.07.2025		C	Reanudar ,Espera			
2	24.07.2026	23.05.2026		C	Programado,Espera			
3	02.06.2027	31.03.2027		C	Programado,Espera			
4	09.04.2028	07.02.2028		C	Programado,Espera			
5	16.02.2029	15.12.2028		C	Programado,Espera			
6	25.12.2029	24.10.2029		C	Programado,Espera			

4.4. Contrastación de hipótesis

Con base en los resultados alcanzados para cada uno de los objetivos establecidos en este estudio, se confirma la validez tanto de la hipótesis general como de las hipótesis específicas.

La contrastación de la hipótesis general se realizó a través de la implementación del software SAP-PM en actividades de mantenimiento preventivo en los equipos de una planta concentradora de minerales, específicamente, para la bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01 utilizada en la operación unitaria de molienda primaria. Los resultados obtenidos evidenciaron una planificación más eficiente mediante la generación automática de órdenes, una mejora en el seguimiento de actividades programadas y una trazabilidad clara de cada intervención. Además, la personalización del sistema permitió adecuarlo a las necesidades específicas de la planta concentradora, facilitando el uso de mejores prácticas en la gestión del mantenimiento. El incremento en el cumplimiento de las tareas programadas, verificado en los registros del sistema, confirmó una mayor eficiencia operativa. Por tanto, los resultados respaldan

la hipótesis general, demostrando que el uso del SAP-PM mejora significativamente el control del mantenimiento preventivo en la planta.

Objetivo específico 1: Identificar los equipos críticos de la planta concentradora de minerales según enfoque RCM.

- A través de la aplicación del enfoque mantenimiento centrado en la confiabilidad, se logró identificar con precisión los equipos críticos de la planta concentradora, considerando los modos de falla más frecuentes, sus consecuencias y la probabilidad de ocurrencia. El análisis detallado reveló que la bomba ASH-200 MCC N°01 presenta modos de falla con alta criticidad, como fuga de carga por el sello y falla del motor eléctrico, ambos con implicancias severas en la seguridad (HS), el entorno (EN) y la operación (OC), con probabilidades altas de ocurrencia. Asimismo, se identificaron fallas con nivel de criticidad alto, como el desgaste del impulsor y de los forros, que requieren acciones preventivas y, en algunos casos, rediseño. Estos hallazgos permitieron establecer estrategias de mantenimiento específicas, como el mantenimiento preventivo y predictivo, con acciones concretas orientadas a mitigar el riesgo de fallas. La identificación basada en RCM también se alineó con la criticidad operacional observada en otros equipos de la molienda primaria.

Objetivo específico 2: Definir las actividades de mantenimiento preventivo correspondientes a los equipos críticos identificados.

- Se definieron las actividades de mantenimiento preventivo para la bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01, equipo clasificado como crítico según el análisis de criticidad previamente realizado. La definición se realizó a partir de un enfoque basado en criterios técnicos y funcionales, empleando la metodología RCM y considerando los modos de falla más recurrentes y sus consecuencias operativas. Como resultado, se elaboró una hoja de ruta compuesta por 16 operaciones técnicas que abarcan

inspecciones visuales y funcionales, lubricaciones, ajustes mecánicos y eléctricos, y tareas de limpieza integral. Estas actividades permiten anticiparse a fallas comunes como desgaste del impulsor, pérdida de alineación del eje o fallas eléctricas del motor. La secuencia estructurada de las tareas facilita su programación sistemática y asegura una ejecución eficiente durante los ciclos de mantenimiento planificado. Esta planificación detallada permite mejorar el control sobre los mantenimientos realizados, reducir el riesgo de paradas imprevistas y, con ello, optimizar la eficiencia operativa del equipo en la planta concentradora.

Objetivo específico 3: Implementar el módulo PM del software SAP para la mejora de la gestión del mantenimiento preventivo en la planta concentradora.

- Se implementó el módulo PM del software SAP para gestionar el mantenimiento preventivo en la bomba AHS-200 MCC N°01 de la planta concentradora. La Figura 25 muestra la configuración del plan de mantenimiento número 502677, basado en el horómetro del equipo (28041 horas) y vinculado a una estrategia codificada (0000005026). A través de esta implementación, el sistema generó automáticamente un cronograma de actividades preventivas futuras, detallando fechas previstas, fechas de inicio y ejecución, tipo de paquete, para este caso denominado como C y el estado de cada orden, que puede ser *Programado* o *En espera*. Con esto se demuestran que la implementación del módulo PM permite una planificación sistemática, reduciendo la intervención manual y mejorando el control operativo. Asimismo, se evidenció una mejora en la trazabilidad del mantenimiento, ya que el sistema registra, organiza y visualiza todas las tareas programadas de manera estructurada. En consecuencia, con el uso del SAP-PM se puede incrementar el cumplimiento de las actividades programadas, facilitar el seguimiento del estado de cada intervención y optimizar la gestión de recursos.

CONCLUSIONES

La implementación del módulo PM del software SAP permitió mejorar significativamente el control de las actividades de mantenimiento preventivo en una planta concentradora de minerales, optimizando la planificación, seguimiento y cumplimiento de tareas.

Se aplicó el enfoque RCM para identificar los equipos críticos de la planta concentradora de minerales, considerando la severidad, consecuencia y frecuencia de los modos de falla. En particular, se determinó que la bomba ASH-200 MCC N°01 presenta una alta criticidad debido a fallas asociadas al sello mecánico y al motor eléctrico. Esta identificación facilitó la selección de estrategias de mantenimiento adecuadas, como el mantenimiento preventivo, predictivo y rediseño, permitiendo priorizar acciones y optimizar los recursos del plan de mantenimiento preventivo en función de la confiabilidad operativa.

Se definió de forma técnica y detallada de las actividades de mantenimiento preventivo para la bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01, permitiendo una planificación más eficiente y enfocada en la prevención de fallas críticas. Con la elaboración de una hoja de ruta estructurada, basada en criterios técnicos del enfoque RCM, se puede garantizar una intervención oportuna y ordenada del equipo, lo que contribuye a minimizar los tiempos de inactividad no programados y a mejorar el desempeño operativo, por tanto, esto demuestra que una adecuada identificación de actividades de mantenimiento, mejora la gestión del mismo y fortalece la confiabilidad de los equipos críticos.

Se implementó el módulo PM del software SAP para diseñar un plan de mantenimiento estructurado y automatizado para la bomba centrífuga AHS-200 MCC N°01. A través de la configuración correcta del equipo, hoja de ruta, tareas de mantenimiento y estrategia de planificación, se logró generar exitosamente el plan 502677. El sistema asignó fechas futuras para las llamadas de mantenimiento en

intervalos regulares, demostrando la efectividad de SAP en la gestión preventiva. Con esta automatización se reduce la probabilidad de fallos inesperados, mejora la planificación de recursos y permite una trazabilidad completa de las intervenciones, alineándose con las mejores prácticas de mantenimiento industrial.

Los resultados obtenidos confirmaron las hipótesis planteadas. Se validó que el empleo del enfoque RCM permitió identificar y priorizar equipos críticos, optimizando la gestión del mantenimiento preventivo, asimismo, se demostró que la definición técnica de las actividades de mantenimiento mejoró la eficiencia operativa de los equipos críticos, y la implementación del software SAP-PM automatizó la planificación y trazabilidad, alineándose con las mejores prácticas del mantenimiento industrial.

RECOMENDACIONES

- Implementar un programa continuo de capacitación y actualización para el personal técnico y de mantenimiento, enfocado en el uso del módulo SAP-PM aplicado a la gestión de equipos, esto permitirá una mayor eficiencia en la planificación, ejecución y seguimiento de actividades de mantenimiento, asegurando un mejor aprovechamiento del sistema, reduciendo errores operativos y fortaleciendo la toma de decisiones basada en datos actualizados y confiables.
- Aprovechar de manera más eficiente las funcionalidades del software SAP-PM para optimizar la planificación de los programas semanales de mantenimiento preventivo. Esto permitirá reducir significativamente los tiempos de generación de órdenes, tanto en áreas mecánicas como eléctricas y electrónicas, mejorando la coordinación operativa y la disponibilidad de los equipos en la planta.
- Elaborar instructivos detallados para cada tipo de mantenimiento aplicable a los equipos de la planta concentradora, incluyendo procedimientos, frecuencias y responsables, asimismo, desarrollar guías específicas para la correcta creación y gestión de planes de mantenimiento en SAP, garantizando la estandarización, trazabilidad y eficiencia en la ejecución de dichas actividades.

REFERENCIAS

- Abdulla, H., Sleptchenko, A., & Nayfeh, A. (2024). Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195, 114342. doi: 10.1016/j.rser.2024.114342
- Boyce, M. P. (2012). Maintenance Techniques. In Meherwan P. Boyce (Ed.), *Gas turbine engineering handbook* (pp. 803-883). Massachusetts: Butterworth-Heinemann.
- Carpio, M. (2018). *Propuesta de Mejora en la Gestión de Mantenimiento Preventivo y RCM con Aplicación del SAP, Arequipa-2017*. (Bachiller - Tesis), Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
- Cohen, T., Baretich, M. F., & Gentles, W. M. (2020). Computerized maintenance management systems. In Ernesto Iadanza (Ed.), *Clinical Engineering Handbook* (pp. 208-218). London: Elsevier.
- ComparaSoftware. (2025). Análisis de Fracttal One. México. Acceso el: 01 Jul. 2025. Disponible en: <https://www.comparasoftware.com/fracttal>
- Daemen, J. J. K. (2003). Mining engineering. In Robert A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of physical science and technology* (pp. 65-96). California: Elsevier Science.
- de Castro-Cros, M., Velasco, M., & Angulo, C. (2021). Machine-Learning-based condition assessment of gas turbines—A review. *Energies*, 14(24), 8468. doi: 10.3390/en14248468
- Diccionario de la lengua española. (2024a). Mena. Real Academia Española. España. Acceso el: 15 Jul. 2025. Disponible en: <https://dle.rae.es/mena?m=form>
- Diccionario de la lengua española. (2024b). Software. Real Academia Española. España. Acceso el: 15 Jul. 2025. Disponible en: <https://dle.rae.es/software?m=form>
- Dong, L., Xiao, Q., Jia, Y., & Fang, T. (2023). Review of research on intelligent diagnosis of oil transfer pump malfunction. *Petroleum*, 9(2), 135-142. doi: 10.1016/j.petlm.2022.01.002
- Durán, O. (2011). Computer-aided maintenance management systems selection based on a fuzzy AHP approach. *Advances in Engineering Software*, 42(10), 821-829. doi: 10.1016/j.advengsoft.2011.05.023
- Fracttal. (2024). Guía técnica: Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM). Madrid, España. Acceso el: 02 Jul. 2025. Disponible en:

<https://www.fracttal.com/es/guias-mantenimiento/mantenimiento-centrado-en-confiabilidad>

- Gómez, J. L. (2017). *Propuesta de mejora a la gestión de mantenimiento utilizando el sistema SAP para los equipos de chancado, molienda, flotación, filtrado y relaves de planta de beneficio de una empresa minero-metalúrgica. Caso Empresa Minera Ares*. (Bachiller - Tesis), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Gutierrez, D. (2024). *Incremento en la disponibilidad de equipos en los procesos de filtrado de relave y relleno en pasta mediante planes de mantenimiento preventivo en SAP en una Unidad Minera*. (Bachiller - Tesis), Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Haldar, S. K. (2018). Mineral Processing. In Swapan Kumar Haldar (Ed.), *Mineral exploration: Principles and applications* (pp. 259-290). Netherlands: Elsevier.
- Hilario, W. A. (2022). *Diseño de un plan de mantenimiento para mejorar la disponibilidad de los equipos de la planta concentradora – Compañía Minera Casapalca*. (Magister - Tesis), Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Jiménez, L., & Muñoz, R. (2006). Integration of supply chain management and logistics: development of an electronic data interchange for SAP servers. *Computer Aided Chemical Engineering*, 21, 2201-2206.
- Mobley, R. K. (2002). Impact of maintenance. In R. Keith Mobley (Ed.), *An introduction to predictive maintenance* (pp. 1-22). Massachusetts: Butterworth Heinemann.
- Saarinen, K., Sander, S., & Westerlund, P. M. (2013). Criticality analysis based maintenance. *Journal of Asset Management*, 26(6), 16-19.
- SAP. (2025). Maintenance Planning (CS-AG/PM-PRM-MP). Washington, Estados Unidos. Acceso el: 25 Jul. 2025. Disponible en: https://help.sap.com/docs/SAP_S4HANA_ON-PREMISE/f7d969cde600466b96094e772632c3f3/b515c253d0a4b54ce1000000a174cb4.html?locale=en-US
- SAP SE. (2025). Productos de SAP. Washington. Acceso el: 08 Jul. 2025. Disponible en: <https://www.sap.com/latinamerica/products.html>
- Sbárbaro, D., & del Villar, R. (2010). *Advanced control and supervision of mineral processing plants*. New York: Springer.

- Shannon, N., Trubetskaya, A., Iqbal, J., & McDermott, O. (2023). A total productive maintenance & reliability framework for an active pharmaceutical ingredient plant utilising design for Lean Six Sigma. *Heliyon*, 9(10), e20516. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20516
- Singal, S. K., Goel, V., Nautiyal, H., & Papantonis, D. E. (2023). Troubleshooting and fault diagnosis in small SHPs. In Sunil Kumar Singal, Varun Goel, Himanshu Nautiyal & Dimitris Papantonis (Eds.), *Small hydropower: Design and analysis* (pp. 271-282). Amsterdam: Elsevier.
- Stross, J. (2024). SAP modules list: Accomprehensive guide for 2025. Texas. Acceso el: 08 Jul. 2025. Disponible en: <https://pathlock.com/blog/sap-modules-list/>
- Zeinalnezhad, M., Chofreh, A. G., Goni, F. A., & Klemeš, J. J. (2020). Critical success factors of the Reliability-Centred Maintenance implementation in the oil and gas industry. *Symmetry*, 12(10), 1585. doi: 10.3390/sym12101585

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia	1
Anexo 2: Despiece de componentes de bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01	3

Anexo 1: Matriz de Consistencia

TÍTULO: MEJORA DEL CONTROL DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN EQUIPOS DE UNA PLANTA CONCENTRADORA DE MINERALES MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE SAP MÓDULO PM				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<u>Problema General</u> ¿En qué medida el uso del software SAP módulo PM mejora el control de las actividades de mantenimiento preventivo en los equipos de una planta concentradora de minerales?	<u>Objetivo General</u> Mejorar el control de actividades de mantenimiento preventivo en equipos de una planta concentradora de minerales mediante el uso del software SAP módulo PM.	<u>Hipótesis General</u> El uso del software SAP módulo PM mejora significativamente el control de las actividades de mantenimiento preventivo en los equipos de una planta concentradora de minerales, al permitir una planificación más eficiente, una implementación de mejores prácticas y personalización de las funcionalidades del software y un alto cumplimiento de las tareas programadas.	Variable Independiente (VI): Uso del software SAP módulo PM. Variable Dependiente (VD): Control de actividades de mantenimiento preventivo.	Tipo de Investigación: Aplicada Nivel de Investigación: Descriptivo y explicativo Diseño de Investigación: No experimental
<u>Problemas Específicos</u> 1). ¿De qué manera el enfoque RCM permite identificar los equipos críticos de la planta concentradora de minerales para priorizar su mantenimiento preventivo? 2). ¿Cómo definir las actividades de mantenimiento preventivo correspondientes a los equipos críticos identificados en la planta concentradora de minerales? 3). ¿Cómo implementar el módulo PM del software SAP para mejorar la gestión del	<u>Objetivos Específicos</u> 1). Identificar los equipos críticos de la planta concentradora de minerales según enfoque RCM. 2). Definir las actividades de mantenimiento preventivo correspondientes a los equipos críticos identificados. 3). Implementar el módulo PM del software SAP para la mejora de la gestión del	<u>Hipótesis Específicos</u> 1). La aplicación del enfoque RCM permite identificar con mayor precisión los equipos críticos de la planta concentradora, facilitando su priorización en el plan de mantenimiento preventivo. 2). La definición de actividades de mantenimiento preventivo basada en criterios técnicos adecuados para los equipos críticos identificados en la planta concentradora permite mejorar la planificación, reducir las fallas imprevistas y		Población y Muestra: Población: Equipos de la planta concentradora de minerales de la Unidad Minera Yauliyacu. Muestra: Bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01 de la marca Warman utilizada en la operación unitaria de molienda primaria. Técnicas e Instrumentos: Instrumentos: Informes, reportes del operario, enfoque RCM.

mantenimiento preventivo en la planta concentradora de minerales?	mantenimiento preventivo en la planta concentradora.	optimizar la eficiencia operativa. 3). La implementación del módulo PM del software SAP mejora la gestión del mantenimiento preventivo en la planta concentradora al aumentar el control, la trazabilidad y el cumplimiento de las actividades programadas.		
---	--	---	--	--

Anexo 2: Despiece de componentes de bomba centrífuga ASH-200 MCC N°01

