



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Diseño de un plan de mantenimiento de filtros prensa
de una planta concentradora de cobre en el
departamento de Tacna en el año 2025**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Electrónica

AUTOR

Patricia Guadalupe ALMEIDA LÓPEZ

ASESOR

Juan Antonio APESTEGUIA INFANTES

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Almeida, P. (2026). *Diseño de un plan de mantenimiento de filtros prensa de una planta concentradora de cobre en el departamento de Tacna en el año 2025*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Patricia Guadalupe Almeida López
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	44165713
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Juan Antonio Apesteguia Infantes
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10423762
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-2545-0764
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Wilbert Chavez Irazabal
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08121733
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Alex Alfonso Gonzales Suárez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07644682
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jean Carlos Malca Fernández
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	45535181
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.6. Gestión
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Tacna Provincia: Tacna Distrito: Ilabaya Latitud: -17.2455556 Longitud: -70.613611
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Enero 2024 – mayo 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN
TESIS
ACTA N°10/FIEE-PPP/2026

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 22 de enero del 2026, como presidente de Jurado el **MG. WILBERT CHAVEZ IRAZABAL**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. ALEX ALFONSO GONZALES SUÁREZ**, el Miembro de Jurado el **MG. JEAN CARLOS MALCA FERNÁNDEZ** y Miembro Asesor el **MG. JUAN ANTONIO APESTEGUIA INFANTES**.

Después de escuchar la Sustentación Presencial de la Tesis de la Bachiller **PATRICIA GUADALUPE ALMEIDA LÓPEZ** con código 05190108 que para optar el Título Profesional de Ingeniera Electrónica sustentó la Tesis titulada **DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO DE FILTROS PRENSA DE UNA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE EN EL DEPARTAMENTO DE TACNA EN EL AÑO 2025**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 14 (CATORCE).

Ciudad Universitaria, 22 de enero del 2026


MG. WILBERT CHAVEZ IRAZABAL
Presidente Jurado


MG. ALEX ALFONSO GONZALES SUÁREZ
Miembro Jurado


MG. JEAN CARLOS MALCA FERNÁNDEZ
Miembro Jurado


MG. JUAN ANTONIO APESTEGUIA INFANTES
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo , **JUAN ANTONIO APESTEGUIA INFANTES** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°07/FIEE-PPP/2026 de la Tesis titulada **DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO DE FILTROS PRENSA DE UNA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE EN EL DEPARTAMENTO DE TACNA EN EL AÑO 2025**, presentado por la bachiller PATRICIA GUADALUPE ALMEIDA LÓPEZ, para optar al título profesional de Ingeniera Electrónica. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 11% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título de Ingeniera Electrónica.

Lima, 22 de Enero del 2026

Firma del Asesor

DNI: 10423762

Nombres y apellidos del asesor:

JUAN ANTONIO APESTEGUIA INFANTES

DEDICATORIA

A J. M. Guadalupe, por todo. A Asencion y Pablo, por las enseñanzas brindadas. A Elvira y Pablito.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco por todo a Josefina Maria
Guadalupe Lopez Laos.

Agradezco a las personas que han podido
contribuir directa e indirectamente en el
desarrollo del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	2
I.1 Introducción	2
I.2 Planteamiento del problema	2
I.2.1 Determinación del problema.....	2
I.2.2 Formulación del problema	3
I.2.2.1 Problema general.	3
I.2.2.2 Problemas específicos.	4
I.3 Objetivos	4
I.3.1 Objetivo general	4
I.3.2 Objetivos específicos.....	4
I.4 Importancia y alcance del proyecto	5
I.5 Limitaciones de la investigación	6
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA	8
II.1 Marco teórico.....	8
II.1.1 Proceso de filtración	9
II.1.1.1 Filtros de vacío.	9
II.1.1.2 Filtros a presión o filtros prensa.....	9
II.2 Antecedentes del estudio	13
II.2.1 Antecedentes nacionales	13
II.2.2 Antecedentes internacionales	14

II.3	Bases teóricas	14
II.3.1	Mantenimiento	14
II.3.2	Clasificación del mantenimiento	15
II.3.2.1	Mantenimiento preventivo.	15
II.3.2.2	Mantenimiento correctivo.	15
II.3.3	Ciclo del mantenimiento	16
II.3.3.1	Identificación de trabajos.....	16
II.3.3.2	Planificación de trabajos.....	17
II.3.3.3	Programación de trabajos.	18
II.3.3.4	Ejecución de trabajos.	18
II.3.4	Ciclo de vida	19
II.3.5	Normativas de mantenimiento	20
II.3.5.1	ISO 14224	20
II.3.5.2	UNE EN IEC 60812	20
II.3.6	Metodologías de mantenimiento	20
II.3.6.1	Mantenimiento preventivo y correctivo	20
II.3.6.2	TPM – Mantenimiento productivo total	21
II.3.6.3	RCM – Mantenimiento centrado en la confiabilidad	21
II.3.6.4	CBM – Mantenimiento centrado en la condición	21
II.4	Definición de términos	22
CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....		26
III.1	Hipótesis.....	26
III.1.1	Hipótesis general.....	26
III.1.2	Hipótesis específicas.....	26
III.1.2.1	Hipótesis específica 1.....	26
III.1.2.2	Hipótesis específica 2.....	26
III.1.2.3	Hipótesis específica 3.....	26
III.1.2.4	Hipótesis específica 4.....	26
III.2	Variables	27
III.2.1	Variable independiente.....	27
III.2.2	Variable dependiente.....	27
III.3	Operacionalización de las variables	27
CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS		28
IV.1	Área de estudio	28
IV.2	Diseño de la investigación	28

IV.3	Población y muestra	28
IV.4	Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información	29
IV.4.1	Información del fabricante	29
IV.4.2	Recolección de información de la muestra	30
IV.4.2.1	Mantenimientos programados.	32
IV.4.2.2	Mantenimientos no programados-correctivos.....	33
IV.5	Análisis estadístico	36
IV.5.1	Mantenimientos y disponibilidad	36
IV.5.2	Eventos reportados	38
CAPÍTULO V. RESULTADOS		39
V.1	Presentación y análisis de resultados	39
V.1.1	Listado de actividades	40
V.1.2	Plan de mantenimiento	42
V.1.3	Costos	44
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN.....		45
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		46
VII.1	Conclusiones	46
VII.2	Recomendaciones.....	46
CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA.....		48
CAPÍTULO IX. ANEXOS.....		51

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1	Variables	27
Cuadro 2	Población de filtros de la planta concentradora, al 2025	29
Cuadro 3	Frecuencia de mantenimiento por el fabricante	30
Cuadro 4	Taxonomía de los equipos de la muestra	31
Cuadro 5	Eventos reportados, enero 2024 a mayo 2025.....	33
Cuadro 6	Repuestos y costos de repuestos usados en correctivos reportados	35
Cuadro 7	Disponibilidad por planta, enero 2024 a mayo 2025.....	36
Cuadro 8	Porcentaje estimado de mantenimiento no programado y programado, enero 2024 a mayo 2025.....	37
Cuadro 9	Listado de actividades	41
Cuadro 10	Plan de mantenimiento	43
Cuadro 11	Precio del cobre.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de Ishikawa (causa-efecto).	3
Figura 2	Precio del cobre por libra, 1985-2021.....	5
Figura 3	Proceso para la obtención de concentrado	9
Figura 4	Filtro Larox	10
Figura 5	Disposición de filtro prensa Larox.....	13
Figura 6	Ciclo de vida de los equipos.....	19
Figura 7	Cantidad de eventos por mes y por equipo	34

RESUMEN

El Perú es un país minero, por ello se debe prestar importancia a los equipos involucrados en el proceso productivo. Los filtros prensa son equipos que forman parte del proceso para la obtención de concentrado de cobre dentro de la industria minera. Los filtros de cobre son la parte final del proceso por lo cual es importante que puedan estar operativos. Las paradas no programadas de estos equipos afectan a la operación tanto a la parte de producción como a la parte de mantenimiento.

El mantenimiento y los planes de mantenimiento son cruciales para que los equipos o los activos puedan funcionar de manera correcta y por lo tanto producir, en este caso, concentrado de cobre.

Se ha realizado el análisis de la estructura del equipo, y en base a ello se han analizado eventos reportados durante el periodo de investigación, tomando como base normas usadas en mantenimiento.

En el presente trabajo se diseñará un plan de mantenimiento enfocado en la parte electrónica y de instrumentación de los filtros, considerando la información del fabricante, los mantenimientos actuales, y los reportes de eventos dentro del periodo de la investigación. El plan de mantenimiento propuesto considera actividades adicionales a las indicadas por el fabricante, haciendo énfasis a la recurrencia de fallas identificadas, con el objetivo de poder tener mejores indicadores para los filtros.

Palabras clave: Mantenimiento, plan de mantenimiento, filtro, equipo, planificación.

ABSTRACT

Peru is a mining country, therefore the equipment involved in the production process must be carefully considered. Pressure filters are equipments that are part of the copper concentrate extraction process within the mining industry. Copper filters are the final stage of the process, so it is important that they remain operational. Unscheduled downtime of this equipment affects both production and maintenance.

Maintenance and maintenance plans are crucial for the equipment or assets to function properly and, in this case, produce copper concentrate.

An analysis of the equipment structure was conducted, and considering this as a basis, events reported during the investigation period were analyzed, using maintenance standards.

In this paper, a maintenance plan will be designed focused on the electronic and instrumentation components of the filters, considering information from the manufacturer, current maintenance activities, and event reports obtained during the research period. The proposed maintenance plan considers additional activities beyond those indicated by the manufacturer, emphasizing the recurrence of identified failures, with the goal of achieving better filter indicators.

Keywords: Maintenance, maintenance plan, filter, equipment, planning

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

I.1 Introducción

La minería consiste en una serie de etapas claves tales como la exploración, la extracción, el procesamiento y el transporte. Para que se lleven a cabo las etapas mencionadas anteriormente es importante que los equipos involucrados se encuentren operativos, y es allí donde entra el mantenimiento con el fin de que los equipos puedan recuperar o conservar sus características funcionales necesarias para poder operar.

En esta tesis se propone un plan de mantenimiento para los filtros prensa correspondientes a la etapa de procesamiento del mineral extraído, específicamente al proceso de filtración de mineral, considerando un enfoque de la parte electrónica y de instrumentación, teniendo en cuenta que la mayor parte de enfoque del mantenimiento para estos equipos se ha realizado considerando sólo la parte mecánica.

La propuesta corresponde al análisis de mantenimientos esencialmente correctivos a través de la información disponible de reportes, a la información del proveedor de acuerdo con el manual del fabricante, y a la información relevante y disponible de estos equipos, durante el periodo de estudio.

I.2 Planteamiento del problema

I.2.1 Determinación del problema

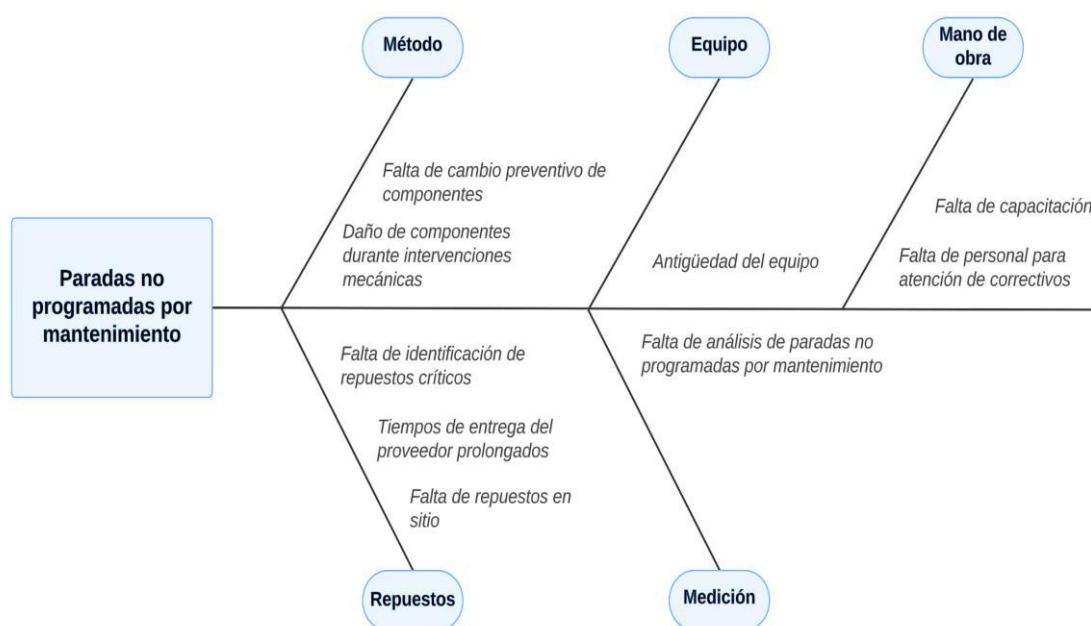
Los filtros prensa automáticos de una planta concentradora de cobre son

la parte final del proceso para la obtención de concentrado de cobre por lo cual las paradas de estos equipos pueden afectar la producción en una planta concentradora e incluso pueden afectar las actividades de la etapa de extracción de minerales.

Mediante el análisis del diagrama de Ishikawa, o de causa-efecto (ver Figura 1), se identificó que la principal problemática para estos equipos son las paradas no programadas por mantenimiento. Se pudo identificar las causas raíz de dicha problemática mediante el análisis de cada uno de los factores que intervienen dentro del mantenimiento.

Figura 1

Diagrama de Ishikawa (causa-efecto).



Nota. El gráfico representa el diagrama de causa-efecto para las paradas no programadas del equipo de la investigación.

1.2.2 Formulación del problema

1.2.2.1 Problema general.

¿De qué manera el diseño de un plan de mantenimiento de filtros prensa automáticos de una planta concentradora de cobre puede contribuir a

optimizar las paradas programadas y reducir las paradas no programadas por correctivos?

1.2.2.2 Problemas específicos.

- PE1: ¿Cuáles son las actividades de mantenimiento preventivo y las actividades recomendadas por el fabricante para el mantenimiento del equipo?
- PE2: ¿Cuáles han sido las principales actividades correctivas y actividades correctivas más recurrentes en el equipo?
- PE3: ¿Cuáles son los repuestos críticos del equipo?
- PE4: ¿Cómo afectan los mantenimientos preventivos y correctivos a los principales indicadores de mantenibilidad del equipo?

I.3 Objetivos

A continuación, se detalla el objetivo general y los objetivos específicos considerados para el presente trabajo.

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un plan de mantenimiento de filtros prensa automáticos de una planta concentradora de cobre, con la finalidad de optimizar los tiempos de paradas programadas y reducir las paradas no programadas por correctivos.

1.3.2 Objetivos específicos

- OE1: Establecer actividades de mantenimiento preventivo e identificar las actividades recomendadas del fabricante del equipo.
- OE2: Identificar las atenciones correctivas correspondientes a los filtros de cobre
- OE3: Estimar los repuestos críticos para mantenimiento
- OE4: Analizar el impacto del plan de mantenimiento a través de indicadores de mantenibilidad.

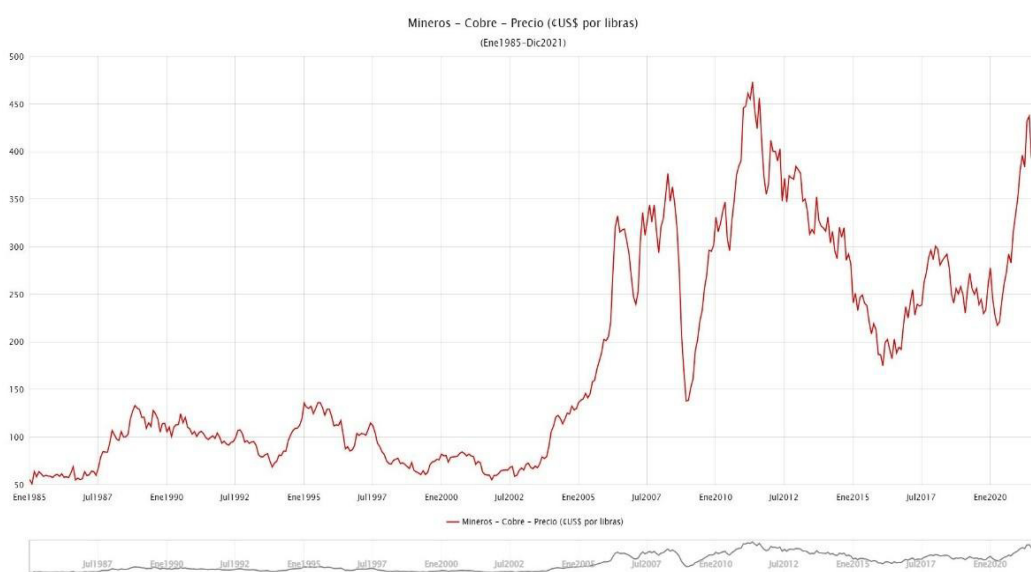
I.4 Importancia y alcance del proyecto

Al estar en una región y un país altamente minero, del cual para el año 2023 el aporte al PBI del sector de minería en el país fue de 10.4%, siendo la participación del cobre en el año 2024 más del 50% del PBI minero en el Perú (Domingo Drago, IIMP), y considerando que se estima que el país cuenta con 100 millones de toneladas métricas de reservas de cobre, se observa la importancia de poder generar la mayor cantidad de producción de este mineral. Esto se vuelve más relevante al poder ver las tendencias al alza en el precio del cobre (ver Figura 2), las cuales se ven afectadas por la demanda nacional e internacional.

El poder contar en las plantas concentradoras con la menor cantidad de paradas de equipo y por ende que los equipos de filtrado estén disponibles contribuirá a que las organizaciones produzcan y cumplan con sus metas de producción de concentrado de cobre.

Figura 2

Precio del cobre por libra, 1985-2021



Nota. El gráfico representa el precio del cobre por libra entre los años 1985 y 2021, en el cual se observa un incremento en el precio después del año 2002. Tomado de BCRP, 2025 (<https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/mensuales/resultados/PN01518BM/html>)

I.5 Limitaciones de la investigación

La investigación brindará un plan de mantenimiento correspondiente a los componentes de instrumentación de filtros prensa automáticos de concentrado de cobre, siendo el desarrollo en base del análisis de:

- Información de operación y mantenimiento por parte del fabricante del equipo.
- Información referencial de actividades de mantenimientos preventivos y correctivos reportados por ejecución.
- Información referencial de obsolescencia de componentes.
- Información referencial de mejoras.

Estando el desarrollo en base a la información mencionada anteriormente, se identifica como limitaciones:

- Falta de actualización de sugerencias de actividades de mantenimiento por parte del fabricante basadas en la retroalimentación de los usuarios.
- Omisión de reportes de mantenimientos correctivos por parte del área de ejecución, limitando así la información para un posterior análisis.
- Omisión de reportes detallados por parte de los operadores del equipo, en los cuales se pueda evidenciar eventos previos o tendencias de falla del equipo o componentes.
- Falta de seguimiento y de información disponible sobre obsolescencia de componentes, y sobre vigencia de estos.
- Limitada información de mejoras implementadas, así como seguimiento del impacto de estas.

En consecuencia, la propuesta de plan de mantenimiento deberá considerarse como referencial, estando ésta sujeta a mejoras considerando que se pueda obtener más información de los puntos tomados para el análisis. Asimismo, debido a que el análisis estará enfocado en la parte electrónica e instrumental del equipo, los resultados podrían ser sesgados

hacia estas disciplinas, cuya mitigación podría llevarse a cabo a través de la conjunción con otras disciplinas tales como la mecánica e hidráulica. La integración con otras disciplinas podría ofrecer nuevas perspectivas para realizar un mantenimiento integral; sin embargo, es importante conocer los requerimientos del mantenimiento de cada disciplina antes de poder realizar una integración.

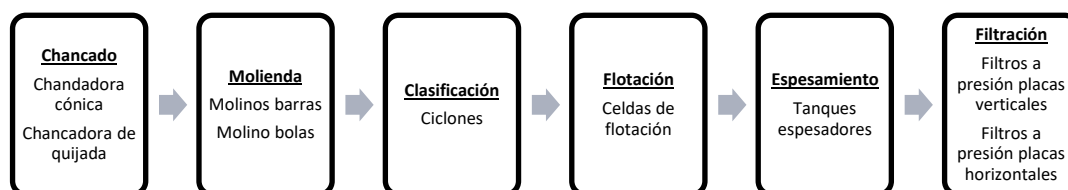
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

II.1 Marco teórico

El cobre es usado a nivel mundial en el día a día en diversos ámbitos tanto de manera industrial como no industrial, siendo encontrado en cables debido a sus propiedades conductivas, en componentes electrónicos, en electrónica de uso general como computadoras, en telefonía, en construcción como tuberías, en instrumentos musicales y hasta en decoraciones y en joyería.

El mineral extraído de yacimientos mineros debe pasar por una serie de procesos para obtener el concentrado de cobre. Una vez extraído el mineral de minas de tajo abierto o minas subterráneas debe ser procesado. El procesamiento se lleva a cabo secuencial en plantas concentradoras, cuyos procesos se pueden dividir en chancado, en el cual se tritura las rocas grandes; molienda, en el cual reduce aún más el tamaño del mineral; clasificación, para separar el mineral entre lo que continúa el proceso y lo que tiene que reprocesarse; flotación, en el cual se le añaden reactivos y del cual ya se obtiene la pulpa de concentrado; espesamiento, del cual se recupera agua y se establecen la cantidad de sólidos de la pulpa; y la filtración, en el cual se retira mayor cantidad de líquido y del cual se obtiene el concentrado del mineral (ver Figura 3).

En la figura 3 se observa la secuencia del procesamiento de minerales, así como los equipos generalmente empleados en cada una de las etapas mostradas, en donde se evidencia que el filtrado corresponde a la última etapa para la obtención de concentrado, siendo para el presente trabajo el concentrado de cobre, aunque se tiene en otros casos filtración para otros minerales como el molibdeno.

Figura 3*Proceso para la obtención de concentrado*

Nota. El gráfico representa el proceso para la obtención de concentrado en donde se pueden identificar seis etapas.

II.1.1 Proceso de filtración

Entre los métodos utilizados para obtener concentrado de cobre, se utilizan el secado y la filtración. El proceso de secado consiste en la evaporación del líquido contenido en la pulpa de concentrado, con lo cual se obtiene el concentrado de cobre con cierto porcentaje de humedad. El proceso de filtración consiste en el uso de un medio filtrante el cual sirve para retener las partículas de concentrado separándolo del líquido. La filtración ofrece la ventaja de brindar un mejor control de la humedad del concentrado saliente.

II.1.1.1 Filtros de vacío.

El principio de funcionamiento de los filtros de vacío consiste en generar un vacío para realizar la separación sólido-líquido. Entre los tipos más usados de filtro de vacío está el filtro de vacío de discos en el cual la pulpa ingresa a las cámaras de los discos, los cuales están conectados a través de un barril central que hace girar los discos.

II.1.1.2 Filtros a presión o filtros prensa.

Los filtros a presión o filtros prensa utilizan placas y telas como medios filtrantes, y es sobre estas placas y telas donde se carga o llena la pulpa a ser filtrada. Las placas pueden estar posicionadas vertical u horizontalmente, siendo algunas de sus diferencias las dimensiones del equipo, así como la forma de descarga del “queque” o concentrado.

Los filtros de placas verticales utilizan un sistema de vibración para descargar el concentrado, siendo bancos con gran cantidad de placas, pero de áreas reducidas, mientras que los filtros de placas horizontales utilizan un sistema de rodillos para realizar la descarga siendo de poca cantidad de placas, pero de áreas mayores comparado con los filtros de placas verticales (ver Figura 4).

Figura 4

Filtro Larox



Nota. Fotografía de una máquina industrial (grises y negros, barandillas amarillas; escalera amarilla a la derecha). Reimpresión de Ltox PII, por Metso, 2024 (<https://www.metso.com/contentassets/350480dac7394804982d8c6c25e9270d/larox-pf-filter-brochure-4398-09-24-en-mng.pdf>). Copyright 2024 por Metso. Reproducida con permiso.

La importancia de los filtros prensa consiste en poder obtener el

concentrado de cobre de acuerdo con las características requeridas para la venta o para la siguiente etapa de procesamiento en la planta de fundición y posteriormente en refinería, en donde se obtienen ánodos y cátodos de cobre con los porcentajes requeridos de cobre. Se debe considerar que estos equipos puedan funcionar correctamente para evitar incidentes en el ámbito de seguridad tanto de personas como del equipo, y para poder llegar a las metas de producción considerando que la inoperatividad de los filtros podría ocasionar parada de equipos en procesos anteriores, y con ello afectar a toda la planta de procesamiento de mineral y hasta el área de extracción de mineral.

El principio de funcionamiento de los filtros prensa consiste en una secuencia de etapas las cuales se repiten de forma cíclica para el funcionamiento continuo del filtro, aunque existen filtros prensa de tecnologías más antiguas en las cuales el funcionamiento no es en ciclos continuos si no por lotes.

Las etapas de funcionamiento para los filtros prensa consisten en la alimentación de pulpa, seguido del prensado de sólidos con aire alta presión, luego el lavado del queque, continuando con un segundo prensado, posteriormente con el secado de sólidos con aire de baja presión, la descarga de sólidos o concentrado, y finalmente el lavado del elemento filtrante o tela, para que el filtro quede listo para el reinicio del funcionamiento de cada etapa.

Para que se puedan llevar a cabo la secuencia de etapas, los filtros poseen varias unidades de funcionamiento para completar cada una de las funciones requeridas, por lo cual en el filtro se identifican las siguientes unidades:

- Alimentación de pulpa: Conformado principalmente por tuberías de alimentación, válvulas y sensores. No se consideran equipos auxiliares que bombean la pulpa hasta el filtro, como bombas, tanques, válvulas de las líneas de alimentación, instrumentación de las líneas y tanques, entre otros.
- Placas/prensado: Conformado por un conjunto de placas de prensado con cámaras donde se deposita la pulpa, el elemento

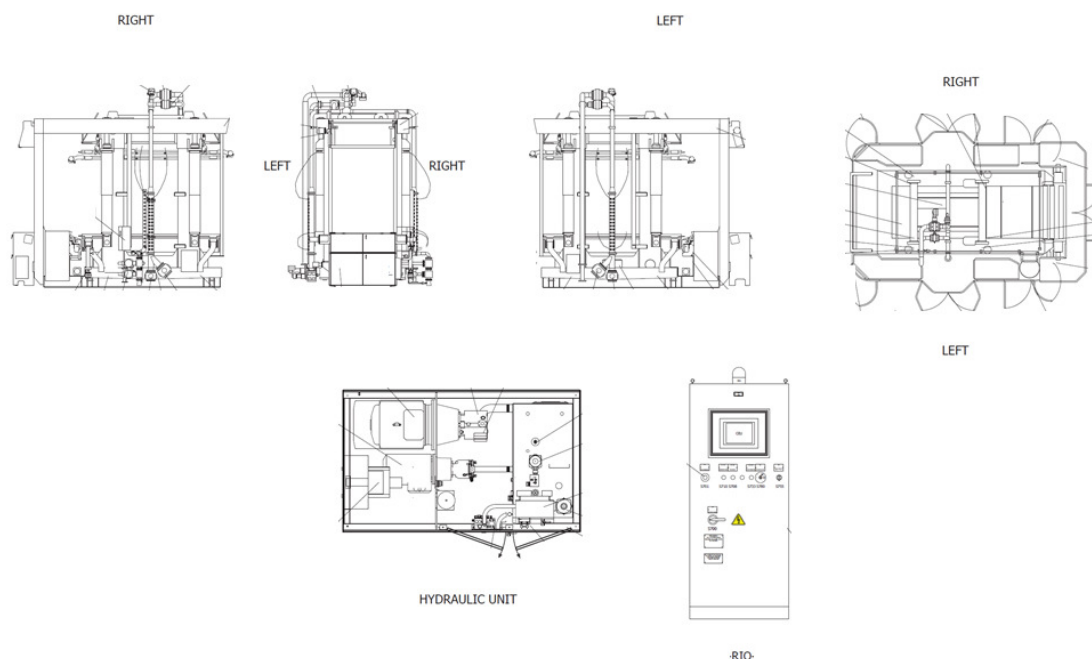
filtrante, los cilindros hidráulicos, entre otros.

- Descarga de concentrado: Conformado principalmente por los raspadores y el chute de descarga, que incluye el sistema de accionamiento de las compuertas de descarga.
- Lavado de queque: Conformado por el sistema de tuberías de lavado, boquillas, válvulas e instrumentación.
- Lavado de tela: Conformado por el sistema de tuberías de lavado, boquillas, válvulas e instrumentación.
- Agua filtrada: Conformado por el sistema de tuberías de agua filtrada, la cual es un agua con un bajo contenido de partículas/sólidos que ha sido extraído durante el proceso de filtración, y válvulas
- Aire de prensado: Conformado por tuberías para aire de alta presión, válvulas y sensores. No se considera a equipos auxiliares que suministran el aire, como compresores, tanques pulmón y la instrumentación correspondiente a los equipos auxiliares.
- Aire de secado: Conformado por tuberías de aire, válvulas y sensores. No se considera a equipos auxiliares que suministran el aire, como compresores y sus tanques pulmones.
- Conducción y tensión de tela: Conformado por motores hidráulicos, rodillos, sensores
- Estructural: Conformado por el sistema de soporte estructural del equipo, como las columnas, puertas
- Hidráulico: Conformado principalmente por la unidad de potencia hidráulica (UPH) y bloques hidráulicos
- Eléctrico: Conformado principalmente por el cableado
- Control: Conformado por la unidad de control remoto, handheld, PLC.

En la figura 5 se puede observar la disposición general de un filtro prensa marca Larox de placas horizontales en el cual la unidad de potencia hidráulica y la unidad de control se ubican fuera del equipo principal, pero muy cerca a este por condiciones de funcionamiento, para una mejor operación y mantenimiento del equipo.

Figura 5

Disposición de filtro prensa Larox



Nota. El gráfico muestra la disposición general del filtro larox. Adaptado de *Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento. Planta de deshidratación. Filtración. Filtro Outotec PF60* (p. 378), 2017, Metso.

II.2 Antecedentes del estudio

II.2.1 Antecedentes nacionales

- Roque (2022) realizó una tesis en la cual presenta el diseño de un plan de mantenimiento preventivo y predictivo de filtros de cobre a través del análisis de eventos de fallos en estos equipos. La propuesta propone la frecuencia de mantenimientos preventivos y recomendaciones de mantenimiento en los filtros de cobre.
- Cuadrado (2022) realizó una tesis en la cual analiza los eventos de fallas y propone un plan de mantenimiento preventivo para disminuir la ocurrencia de las fallas detectadas.
- Flores (2023) realizó una tesis en la cual presenta el diseño de un plan de mantenimiento bajo enfoque RCM. Se desarrolla la jerarquización de equipos y se proponen tareas para mejorar la

confiabilidad de los equipos.

II.2.2 Antecedentes internacionales

- Torvela (2023) presentó una tesis la cual se enfoca en la actualización del plan de mantenimiento preventivo y del monitoreo de condición de filtros prensa Larox. La investigación examina los problemas y retos que se han presentado en los equipos para la actualización del mantenimiento preventivo.
- Peltonen (2025) desarrolló en una tesis métodos para la mejora del mantenimiento preventivo enfocándose en la reducción de mantenimientos correctivos, en la mejora de la confiabilidad de los equipos y en la reducción de los costos de mantenimiento.
- Pinciroli et al. (2023), presentó un artículo el cual explora las tecnologías 4.0 en referencia a la optimización del mantenimiento, considerando el tipo de información disponible.

II.3 Bases teóricas

II.3.1 Mantenimiento

El mantenimiento se puede definir como la preservación de un activo en buenas condiciones de funcionamiento tal que el activo pueda ser usado en su capacidad productiva total (Gulati, 2021, p. 70). Visiones actualizadas de mantenimiento incluyen las actividades para el aseguramiento de la capacidad del activo.

Existen diferentes enfoques de mantenimiento, entre los cuales se tiene el mantenimiento basado en la condición (CBM¹), también conocido como mantenimiento predictivo (PdM²); el mantenimiento preventivo (PM³); el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM⁴); el mantenimiento basado

¹ CBM: Condition-Based Maintenance o Mantenimiento basado en la condición

² PdM: Predictive Maintenance o Mantenimiento predictivo

³ PM: Predictive Maintenance o Mantenimiento preventivo

⁴ RCM: reliability-Centered Maintenance o Mantenimiento centrado en la confiabilidad

en el riesgo (RBM⁵); el mantenimiento proactivo, y el mantenimiento correctivo (CM⁶). La elección o elecciones del enfoque a emplear dependerá de la estrategia que se decida de manera empresarial, considerando los impactos en producción y costos.

II.3.2 Clasificación del mantenimiento

Según libro Maintenance and Reliability Best Practices y la norma ISO⁷ 144224, el mantenimiento se puede clasificar en dos grupos, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo, siendo éstos el mantenimiento antes de la falla y el mantenimiento después de la falla, respectivamente.

II.3.2.1 Mantenimiento preventivo.

El mantenimiento preventivo consiste en el mantenimiento que se realiza antes que el activo presente una falla. El mantenimiento preventivo puede abarcar el CBM, RBM, TBM⁸, siendo este tipo de mantenimiento planificado y programado.

Para poder estructurar un sistema mantenimiento preventivo se requiere un análisis del equipo, como la información del fabricante, históricos de equipos similares, análisis de las condiciones de operación, entre otros para establecer rutinas de actividades, frecuencias de intervención, repuestos requeridos y personal involucrado.

II.3.2.2 Mantenimiento correctivo.

El mantenimiento correctivo consiste en el mantenimiento que se realiza cuando ya se ha presentado la falla en el activo, siendo que el equipo pueda o no continuar en operación total o parcialmente. El mantenimiento correctivo se puede subclasificar en mantenimiento correctivo programado y mantenimiento correctivo no programado, de acuerdo con el momento establecido por parte de los involucrados para la ejecución de la actividad del correctivo.

⁵ RBM: Risk-Based Maintenance o Mantenimiento basado en el riesgo

⁶ CM: Corrective Maintenance o Mantenimiento correctivo

⁷ ISO: International Organization for Standardization u Organización internacional de normalización

⁸ TBM: Time-Based Maintenance o Mantenimiento basado en el tiempo

Para el mantenimiento correctivo programado se puede o se requiere planificar las actividades y programar la fecha de intervención del activo para devolverle al activo sus funciones de operatividad; mientras que en el mantenimiento correctivo no programado o reactivo se requiere devolver al activo sus funciones de trabajo para continuar con la operatividad del activo, sin considerar la programación ya que para estos casos en el cual el activo quedó inoperativo es necesaria su intervención de manera inmediata para reducir el impacto en la disponibilidad y producción de la planta.

II.3.3 Ciclo del mantenimiento

El ciclo del mantenimiento se puede describir como una secuencia de etapas la cual de manera general inicia con la identificación de los trabajos, seguida de la planificación, posteriormente con la programación, y finalmente con la ejecución de los trabajos. De la ejecución de trabajos se puede obtener información importante y necesaria para poder reiniciar el ciclo de mantenimiento con la identificación de trabajos.

De manera similar, bajo el enfoque del pilar 5 gestión del trabajo del SMRP⁹ se tienen las etapas mencionadas anteriormente, adicionalmente a otras etapas como la priorización del trabajo, documentación del trabajo, análisis y seguimiento, medición, entre otras, que sirven como parte de las buenas prácticas del mantenimiento y que pueden estar incluidas dentro de las cuatro etapas mencionadas.

A continuación, se detalla las cuatro etapas mencionadas inicialmente para el ciclo de mantenimiento.

II.3.3.1 Identificación de trabajos.

De manera simplificada, la identificación de trabajos responde a la pregunta ¿Qué? La identificación de trabajos consiste en las actividades de mantenimiento que requieren ser realizadas en el equipo. La identificación de trabajos a ejecutar puede realizarse a través de la información del fabricante del equipo, el backlog de trabajos no ejecutados, el backlog de actividades correctivas, y el listado de actividades de mantenimiento

⁹ Society for Maintenance & Reliability Professionals (Sociedad de Profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad)

preventivo. La identificación de trabajos permitirá que se pueda continuar con la secuencia para realizar el mantenimiento. Se deberá considerar que la identificación es un proceso que será continuo, es decir, que las actividades podrán estar sujetas a revisión y actualización.

II.3.3.2 Planificación de trabajos.

La planificación de trabajos consiste en determinar lo necesario para que se pueda ejecutar el mantenimiento de manera completa. Dentro de los puntos a considerar está si se requiere el activo operando o no, así como los recursos los cuales son todo aquello que es requerido para poder ejecutar la actividad de mantenimiento sin importar si éste es preventivo o correctivo. Entre los recursos requeridos se tiene la mano de obra, los repuestos, herramientas y equipos auxiliares. La planificación de trabajos responde a la pregunta ¿Cómo?

A continuación, se detallan los recursos generales requeridos a poder ser analizados para la planificación de actividades de mantenimiento.

- **Mano de obra:** Es el personal especialista y no especialista requerido para ejecutar una actividad de mantenimiento. Se considera que el personal pueda ser de diferentes disciplinas, como por ejemplo operación, mecánica, electrónica, eléctrica, hidráulica, entre otras. El personal considerado para la mano de obra debe ser personal capacitado y calificado, asimismo el personal deberá cumplir con los lineamientos en el ámbito de seguridad.
- **Repuestos:** Los repuestos son los componentes o piezas que requieren ser reemplazados para mantener o devolverle al activo sus funciones de operación. No en todos los casos se requiere de algún repuesto, la decisión del reemplazo de un componente dependerá del mantenimiento previo y de un análisis de la condición o falla en el activo durante la ejecución de la actividad. Se requerirá una evaluación periódica para establecer los repuestos críticos requeridos para mantener el activo, considerando también los tiempos de entrega para poder tener el recurso disponible ante un evento de falla y poder continuar con

la operación y producción.

- **Herramientas y equipos auxiliares:** Las herramientas y equipos auxiliares son los recursos necesarios para poder intervenir el activo a través de un reemplazo de un repuesto, ajuste o configuración de un repuesto o de un componente y de acuerdo con la necesidad. Las herramientas y equipos auxiliares pueden ser ordenadores, llaves, desarmadores, alicates, sopladores, luminarias, multímetros, elevadores, andamios, grúas, entre otros requeridos.

II.3.3.3 Programación de trabajos.

La programación del trabajo responde a las preguntas ¿Cuándo? y ¿Quién? La programación consiste en indicar cuándo se realizará la actividad de mantenimiento planificada y por tanto con los recursos disponibles, considerando la oportunidad adecuada para la intervención del activo, así como considerando si éste requiere que esté operando o no, el personal disponible para la intervención, y las interferencias que pudiese haber con otras áreas.

II.3.3.4 Ejecución de trabajos.

La ejecución de trabajos consiste en la realización de los trabajos identificados, con los recursos establecidos en la fecha o programación determinada en los pasos anteriores. Durante la ejecución de trabajos es importante poder realizar un registro de la actividad realizada para que esta información pueda servir de retroalimentación. La retroalimentación de la información puede ser una parte crucial para la mejora del mantenimiento del equipo, ya que durante la ejecución se podrá evidenciar la eficacia de las etapas anteriores.

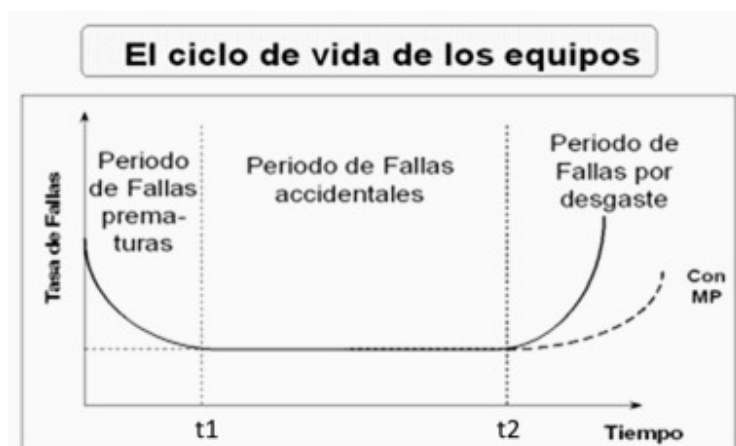
Dentro de la ejecución de trabajos debe considerarse como primeros pasos las actividades relacionadas con la seguridad de las personas y de los equipos, es decir, la elaboración de los procedimientos de trabajo, elaboración y autorización de permisos correspondientes teniendo en cuenta que los formatos de seguridad deben ser elaborados y revisados por el personal involucrado, en cumplimiento con las normativas vigentes para cada sector.

II.3.4 Ciclo de vida

El estudio de fallas de un activo dentro de su ciclo de vida ha determinado un patrón de fallas probables, cuya curva representativa se conoce como curva de la bañera (ver Figura 6).

Figura 6

Ciclo de vida de los equipos



Nota. El gráfico representa el ciclo de vida de los equipos, evaluado a través de la tasa de fallas versus el tiempo, notándose que presenta una forma de bañera. Tomado de *Planificación y Programación del Mantenimiento* (p. 37), 2016, Tecsup.

En la curva de la bañera se observan tres periodos: de fallas prematuras, de vida útil o fallas accidentales y de fallas por desgaste. En el periodo de fallas prematuras, desde el inicio de operación hasta un tiempo t_1 , se tiene una alta tasa de falla las cuales van decreciendo en el tiempo y las cuales son ocasionadas principalmente por componentes de fabricación débil. En el periodo de vida útil o fallas accidentales, desde el tiempo t_1 hasta un tiempo t_2 , se tiene una alta tasa de falla baja. En el periodo de fallas por desgaste, desde el tiempo t_2 hasta el fin de la vida útil del equipo o activo, se tiene una alta tasa de fallas la cual se observa de forma creciente, y las cuales son ocasionadas por los años de operación y desgaste de componentes; sin embargo, la tendencia creciente de la falla puede verse afectada si se implementan acciones de mantenimiento preventivo (MP), así como mantenimientos preventivos mayores u overhauls.

II.3.5 Normativas de mantenimiento

Dentro de la gama de normativas aplicables al mantenimiento se tienen normas que establecen principios y pautas para el manejo de datos utilizables en mantenimiento, de tal forma que entre las opciones presentadas se tienen la ISO 14224 y la UNE EN IEC 60812.

II.3.5.1 ISO 14224

Es una norma internacional que consiste en los requisitos e información necesaria para la obtención de datos usados para mantenimiento y confiabilidad. Se caracteriza por definir una taxonomía o estructura del activo, así como mecanismos de falla (ver Anexo 1) y causas de fallas (ver Anexo 2). La información del análisis puede ser empleada en la determinación y aplicación de metodologías de mantenimiento, ya que se brinda un análisis por unidades de las cuales se puede indicar la repetibilidad de fallas.

II.3.5.2 UNE EN IEC 60812

Es una norma internacional que define técnicas de análisis de fiabilidad de sistemas y procedimientos de análisis de modos de fallos y de sus efectos (AMEF). La norma se caracteriza por requerir un análisis funcional de los sistemas y componentes del equipo con lo cual se realiza una identificación de los posibles modos de fallas, de las causas y efectos de los mismos. En este caso se realiza una evaluación de riesgos considerando la severidad, la ocurrencia y la detectabilidad. Esta norma suele ser aplicada para el posterior uso en la aplicación de la metodología RCM.

II.3.6 Metodologías de mantenimiento

Las metodologías de mantenimiento corresponden al enfoque en el tipo y desarrollo en la gestión de mantenimiento que se brindará a un activo. Entre las metodologías más utilizadas se puede identificar las de mantenimiento preventivo-correctivo, mantenimiento productivo total o TPM, mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM y mantenimiento centrado en la condición o CBM.

II.3.6.1 Mantenimiento preventivo y correctivo

El mantenimiento preventivo-correctivo es la primera metodología que

suele aplicarse a un equipo. Se considera que un equipo debería tener 20% de mantenimiento correctivo y 80% de mantenimiento preventivo, siendo los valores en similares o en porcentajes inversos motivo de evaluación de la aplicación o de fallas mayores en el equipo.

II.3.6.2 TPM – Mantenimiento productivo total

El TPM consiste en involucrar a la parte operativa en el mantenimiento del equipo o activo, siendo de esta manera los primeros en atender las actividades básicas o esenciales del mantenimiento ya que este personal es el que está en el día a día en contacto con los equipos. Para su implementación se requerirá del compromiso desde la alta dirección para poder llevar a cabo el TPM, siendo unos de los pasos esenciales la capacitación del personal para identificar síntomas de falla y llevar a cabo tareas básicas de inspección y de mantenimiento básico, considerando la planificación de actividades.

II.3.6.3 RCM – Mantenimiento centrado en la confiabilidad

El mantenimiento basado en la confiabilidad requerirá la priorización de equipos en la planta, así como el reconocimiento de criticidades y de fallas. Para la implementación se requerirá identificar las fallas que pueden ocurrir en el equipo, las consecuencias o impacto en el mismo, así como en la producción, seguridad y medio ambiente. Para su implementación se hace uso del análisis de modos de falla y de sus efectos (AMEF).

II.3.6.4 CBM – Mantenimiento centrado en la condición

En el mantenimiento basado en la condición se debe realizar un monitoreo del equipo para determinar la condición o momento en que podría ocurrir una falla, bajo en análisis de parámetros del equipo. Para su implementación se deberá identificar el equipo, los parámetros que puedan o deban monitorearse, realizar un análisis de información y realizar una intervención de acuerdo con el resultado del análisis de parámetros. Para la implementación se deberá evaluar la inclusión de sensores e instrumentos para poder obtener la información requerida, y en todo caso evaluar la factibilidad de su implementación.

II.4 Definición de términos

- **Backlog:** En mantenimiento se refiere a una lista de actividades que no han podido realizarse por falta de un recurso (mano de obra, repuesto, herramienta o equipo auxiliar), o de programación de la actividad. Las actividades del backlog son actividades requeridas para devolverle a los activos sus características de funcionamiento.
- **Causa de falla:** Serie de circunstancias que conducen a una falla. Para poder hallar la causa de la falla se requiere la información relacionada al evento de falla (circunstancias), y realizar un análisis para poder detectar la falla.
- **Ciclo de vida:** Tiempo de vida de un activo, el cual inicia en con su adquisición, uso, y termina en su disposición final.
- **Confiabilidad:** Capacidad de un ítem para realizar una función requerida bajo condiciones dadas durante un intervalo de tiempo dado.
- **Costos:** En mantenimiento se refiere al gasto involucrado para devolverle o mantener el activo con sus características de funcionamiento.
- **Disponibilidad:** Capacidad de estar en un estado para funcionar según lo requerido.
- **Eficacia general del equipo u overall equipment efficiency (OEE):** Indicador que mide la eficacia del equipo. Se calcula multiplicando la disponibilidad, el rendimiento, y la calidad
- **Falla:** Pérdida de la capacidad de un activo o equipo de realizar lo requerido según su diseño.
- **ISO 14224:2016 Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos:** Es una norma internacional que consiste en los requisitos e información necesaria para la obtención de datos usados para mantenimiento y confiabilidad.
- **Mantenibilidad:** Capacidad de conservar, o restaurar a un estado de rendimiento requerido, bajo condiciones dadas de uso y

mantenimiento.

- Mantenimiento: Combinación de todas las acciones técnicas y de gestión que tienen la intención de retener un ítem, restaurarlo a un estado en que pueda realizar lo requerido.
- Mantenimiento basado en la condición (CBM por sus siglas en inglés): Mantenimiento preventivo basado en la evaluación de la condición física.
- Mantenimiento predictivo (PdM): Mantenimiento basado en la predicción de una condición futura de un ítem valorado o calculado desde una serie definida de datos históricos y parámetros operacionales futuros conocidos
- Mantenimiento preventivo (PM por sus siglas en inglés): Mantenimiento llevado a cabo para mitigar la degradación y reducir la probabilidad de falla
- Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM por sus siglas en inglés): El mantenimiento centrado en la confiabilidad se enfoca en brindar confiabilidad a los equipos, por lo cual el mantenimiento se basa en identificar los posibles modos de falla y establecer estrategias de mantenimiento para eliminar o reducir estos eventos.
- Mantenimiento basado en el riesgo (RBM por sus siglas en inglés): El mantenimiento basado en el riesgo se enfoca en valorar las probabilidades de falla, así como de su impacto, por lo cual el mantenimiento se basa en establecer estrategias de mantenimiento basadas en el impacto operativo, de seguridad y económico.
- Mantenimiento correctivo (CM por sus siglas en inglés): Mantenimiento llevado a cabo después de la detección de una falla hasta completar la restauración.
- Mantenimiento reactivo: Es el tipo de mantenimiento que se realiza después que ha ocurrido o se ha detectado una falla con el fin de devolverle al equipo sus características de operación.
- Mecanismo de falla: Proceso que conduce a una falla del activo o equipo.

- **Overhaul:** Actividades de mantenimiento que se ejecutan para devolverle al activo condiciones de funcionamiento similares a las obtenidas en el inicio de operación.
- **Plan de mantenimiento:** Serie de tareas estructuradas y documentadas que incluye las actividades, procedimientos, recursos y la escala de tiempo requerida para llevar a cabo el mantenimiento.
- **Planificación de Recursos Empresariales o Enterprise Resource Planning (ERP):** Es un software que centraliza la gestión de recursos de una empresa, entre recursos humanos, finanzas, logística y otros. No debe confundirse a este tipo de software como un software dedicado a actividades de mantenimiento.
- **Presupuesto de mantenimiento:** Costos estimados para realizar el mantenimiento a los activos o reemplazarlos. El presupuesto debe incluir repuestos, mano de obra y cualquier otro recurso para poder llevar a cabo las actividades de mantenimiento.
- **Registro de mantenimiento:** Parte de la documentación del mantenimiento que contiene toda la información de fallas, defectos y mantenimiento relacionada a un ítem.
- **Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado o Computerized maintenance management system (CMMS):** Es un software que centraliza la gestión del mantenimiento. Este tipo de software es especializado en mantenimiento, y no debe confundirse con el software para la planificación de recursos empresariales.
- **Sociedad de Profesionales de Mantenimiento y Confiabilidad (SMRP por sus siglas en inglés):** Es una organización enfocada en impulsar la profesión del mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos. Tiene 5 pilares en los cuales se basa. Brinda una certificación, CMRP Certified Maintenance & Reliability Professional, la cual acredita el conocimiento en los 5 pilares a profesiones en el área de mantenimiento.
- **Taxonomía:** Para la ISO 14224, la taxonomía clasifica a los equipos de acuerdo con la industria, categoría de negocio,

instalación, planta o unidad, sistema, equipo, subunidad, componente o ítem mantenible, y pieza, con el fin de poder tener una mejor visión del activo.

- Tiempo medio de reparación o mean time to repair (MTTR): Es el tiempo esperado para lograr la reparación de un ítem con falla. Se calcula como el tiempo total de reparación entre el número de reparaciones.
- Tiempo medio entre fallos o mean time between failures (MTBF): Es el tiempo transcurrido esperado entre fallas sucesivas de un ítem reparable. Se calcula como el tiempo total de operación entre el número de fallos
- Tiempo medio hasta el fallo o mean time to failure (MTTF): Es el tiempo esperado antes de que falle un componente, es decir entre la puesta de servicio o marcha de un equipo, hasta la falla.

CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

III.1 Hipótesis

III.1.1 Hipótesis general

La implementación de un plan de mantenimiento adecuado para los filtros prensa automáticos que considere la cantidad actividades de mantenimiento adecuadas para el equipo reduce la cantidad fallas que se presenten en estos equipos durante sus periodos de funcionamiento.

III.1.2 Hipótesis específicas

III.1.2.1 Hipótesis específica 1.

La implementación de estrategias de mantenimiento preventivo reduce la frecuencia de fallas en los filtros prensa de placas horizontales de la planta concentradora de cobre.

III.1.2.2 Hipótesis específica 2.

El establecimiento de un plan de mantenimiento estructurado mejora la eficiencia del proceso de filtrado.

III.1.2.3 Hipótesis específica 3.

Un mantenimiento adecuado mejora los costos operativos y aumenta la vida útil de los filtros prensa en la planta concentradora de cobre.

III.1.2.4 Hipótesis específica 4.

El análisis de eventos de fallas en los filtros prensa contribuye a la mejora del mantenimiento propuesto por el fabricante a través de la retroalimentación de la información de acuerdo con el análisis de las fallas presentadas.

III.2 Variables

III.2.1 Variable independiente

Para el trabajo se ha determinado como variable independiente la cantidad de actividades de mantenimiento.

III.2.2 Variable dependiente

Se considera como variable dependiente la cantidad de fallas.

III.3 Operacionalización de las variables

Para la investigación se han utilizado las variables indicadas en el punto 3.2., para las cuales se ha podido realizar un análisis cuantificable de eventos. Para el análisis mencionado, se han estructurado las variables según el cuadro 1.

Cuadro 1

Variables

	Variables	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente	Cantidad de actividades de mantenimiento	Número de actividades	Valor observable	Cuantitativo
Variable dependiente	Cantidad de fallas	Número de fallas	Valor observable	Cuantitativo

Nota. El cuadro muestra las variables, dimensiones indicadores y escala de medición considerados para la investigación.

CAPÍTULO IV. MATERIALES Y METÓDOS

IV.1 Área de estudio

El estudio es del tipo transversal, su ejecución se inicia en enero 2024 y su término es en mayo 2025. El proyecto se circunscribe en el distrito de Ilabaya, en la provincia de Jorge Basadre, en el departamento de Tacna, a 17°14'44" de latitud sur y 70°36'49" de latitud oeste, durante los años 2024 al 2025.

IV.2 Diseño de la investigación

La investigación será no experimental, de tipo transversal, en la cual se revisarán y analizarán los datos e información correspondiente a actividades correctivas de los equipos en estudio. Adicionalmente, se revisará la información y sugerencias de mantenimiento por parte fabricante de acuerdo con el manual de operación y mantenimiento.

IV.3 Población y muestra

La investigación se desarrolla entorno a equipos conocidos como filtros prensa de placas horizontales de la marca Larox del área de concentradora. La población consiste en un total de cuatro filtros prensa instalados en la planta concentradora, siendo la muestra tres filtros con características constructivas similares, pero con diferentes números de ciclos totales de operación o trabajo (ver Cuadro 2).

Cuadro 2

Población de filtros de la planta concentradora, al 2025

Filtro	Cantidad de placas	Año de inicio operación	Ciclos operados		
			Ene-2019	Ene-2024	May-2025
FC-1	10	N/A	N/A	N/A	N/A
FC-2	16	2005	474,419	658,128	709,639
FC-3	16	2018	1,847	107,063	138,245
FC-4	16	2018	1,837	104,408	138,056

Nota. El cuadro muestra la población de cuatro filtros en el área de concentradora, así como el año de inicio de operación y los ciclos operados.

Las características constructivas similares corresponden principalmente al número de placas utilizadas para realizar el prensado, siendo la cantidad de la muestra de 16 placas, cada una con un área de filtrado de 6 metros cuadrados, y al tipo de operación correspondiente al elemento filtrantes el cual es de tipo tela continua, a diferencia de otros tipos en el cual la tela pasa por un proceso de rebobinado, cual toma un tiempo adicional para la operación.

IV.4 Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información

IV.4.1 Información del fabricante

De acuerdo con el manual del fabricante (Outotec, 2017), se identifica dentro de las actividades de mantenimiento programado principalmente actividades mecánicas y algunas actividades eléctricas-electrónicas básicas.

Las actividades consideradas en el ámbito de la electrónica-instrumentación están relacionadas con tareas de verificación e inspección (ver cuadro 3). Las actividades propuestas por el fabricante se establecen de acuerdo con componentes, a través de frecuencias por ciclos de operación la cual es el tipo de métrica comúnmente empleada para los filtros debido a la duración promedio de cada ciclo.

Cuadro 3*Frecuencia de mantenimiento por el fabricante*

Componente	Frecuencia ciclos/vida útil					Funcionamiento
	90 Diario	625 Semanal	2500 Mensual	15000 Semestral	30000 Anual	
Interruptores de parada de emergencia		INS				Verifique el funcionamiento mediante una prueba.
Interruptores de posición		INS				Compruebe el montaje, la limpieza y la condición mecánica. Consulte la disposición de los filtros en los planos eléctricos para ver una lista de objetivos
Interruptores de presión			INS			Compruebe el montaje, la limpieza y la condición mecánica. Consulte la disposición de los filtros en los planos eléctricos para ver una lista de objetivos.
Accionadores de válvulas				INS		Inspección visual en busca de fugas.

*INS: Inspección

Nota. El cuadro muestra el extracto de actividades de mantenimiento de componentes electrónicos-instrumentación y sugeridos por el fabricante de acuerdo con la cantidad de ciclos operados. Adaptado de *Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento. Planta de deshidratación. Filtración. Filtro Outotec PF60* (p. 252-253), 2017, Metso.

IV.4.2 Recolección de información de la muestra

Los datos analizados han sido obtenidos principalmente de reportes diarios por parte del área de ejecución del mantenimiento, así como reportes del área operativa, extraídos del ERP.

Los tres filtros considerados en la muestra tienen una operación cíclica, es decir la pulpa ingresa al filtro y se realiza el proceso de filtrado para que posteriormente en el siguiente ciclo ingreso otra carga de pulpa. La duración de cada ciclo de operación de aproximadamente 12 minutos, y el tonelaje de concentrado de cobre obtenido es aproximadamente de 10 toneladas por ciclo.

Dentro del periodo de la investigación se considera una parada general de la planta 1 (FC-1 y FC-2) y de la planta 2 (FC-3 y FC-4) de forma simultánea, la cual se llevó a cabo en el mes de noviembre 2024, por lo cual se realizarán observaciones puntuales respecto a los datos obtenidos para ese mes.

Para el periodo de estudio, se ha realizado el análisis de la taxonomía de los equipos de la muestra bajo el enfoque del ISO 14224-2016 (ver Cuadro 4). La norma ISO 14224-2016 establece la forma de recopilación de datos relacionados a confiabilidad y mantenimiento, estructurándolos de acuerdo con la taxonomía propuesta en la norma y analizándolos de acuerdo con mecanismos de fallas y causas de fallas.

Cuadro 4

Taxonomía de los equipos de la muestra

Categoría Principal	Nivel Taxonómico	Jerarquía de Taxonomía	Definición	Desarrollo
Datos de uso/ ubicación	1	Industria	Tipo de industria principal	Minería
	2	Categoría del negocio	Tipo de negocio o flujo de procesos	Midstream
	3	Instalación	Tipo de instalación	Procesamiento de minerales
	4	Planta/Unidad	Tipo de planta/unidad	Filtrado de cobre
	5	Sección/Sistema	Sección/sistema principal de la planta	Filtrado
Subdivisión de equipos	6	Unidad del equipo	Clase de equipos similares. Cada clase de equipo contiene unidades de equipos comparables (ej. compresores).	Filtro a presión
	7	Sub-unidad	Un subsistema necesario para la función del equipo	Alimentación de pulpa Placas/prensado Descarga de concentrado Lavado de tela Agua filtrada Aire de prensado Aire de secado Conducción y tensión de tela Estructural Hidráulico Eléctrico Control Sensor Tarjeta
	8	Componente/ Ítem Mantenible (MI) a	El grupo de piezas del equipo que comúnmente se mantienen (se reparan/se restauran) como un todo	Control/Mando Válvula Motor Cableado
	9	Pieza b	Una parte individual del equipo	Transmisor Conector Actuador

a Para algunos tipos de equipos, es posible que no exista un MI; p.ej. Si la clase de equipos es de tuberías, puede que no haya un MI, pero el componente puede ser el "codo".

b Este nivel puede ser útil en algunos casos, sin embargo, se considera opcional en este Estándar Internacional.

Nota. El cuadro muestra la taxonomía según la norma: ISO 14224-2016. Adaptado de *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016)* (p. 39), 2016, BSI.

La taxonomía se divide en dos grandes categorías, siendo primera categoría de datos de uso o ubicación, y la segunda categoría de la subdivisión de equipos. Adicionalmente, la taxonomía muestra en la categoría de subdivisión de equipo la jerarquía con la cual se han analizado los eventos, tales como las subunidades, componentes y piezas que han sido evaluados de la información de los reportes, y las cuales brindan una mejor visión del equipo (ver Cuadro 4).

En el cuadro 4 se observa el desarrollo detallado de cada una de las jerarquías para el filtro prensa, de tal forma que se puede ver el detalle de las subunidades, componentes/ítems mantenibles y piezas consideradas para este equipo, y con las cuales se hará el análisis.

IV.4.2.1 Mantenimientos programados.

Actualmente se considera una programación de mantenimiento preventivo semanal, que consiste en la inspección de componentes y funcionamiento del equipo en general. Las actividades de mantenimiento de instrumentos y componentes eléctricos y electrónicos están alineadas con las actividades de mantenimiento mecánico, con el fin de poder programar y coordinar una sola fecha de parada de equipo y que éste pueda ser entregado por el área de operaciones en las condiciones para realizar el mantenimiento preventivo, tales como filtro descargado y lavado, es decir que el filtro quede sin pulpa o concentrado entre las placas y que esté limpio.

Los tiempos de mantenimiento preventivos son considerados en el cálculo de disponibilidad planificada de la planta, los cuales corresponden a tiempos de mantenimiento integral, es decir, mantenimiento mecánico y mantenimiento eléctrico y de instrumentación. El tiempo semanal solicitado para el mantenimiento preventivo integral de cada equipo es de 12 horas, considerando de manera anual una intervención por 72 horas para realizar un mantenimiento mayor, el cual considera principalmente actividades mecánicas. Dentro del periodo analizado, se ha realizado mantenimientos programados semanales, y eventualmente mensuales, así como se ha tenido una parada mayor para mantenimiento integral de todos los equipos de planta concentradora en noviembre 2024.

IV.4.2.2 Mantenimientos no programados-correctivos.

Se han obtenido los reportes de 35 eventos correctivos durante el periodo enero 2024 a mayo 2025 correspondientes a los 3 filtros de la muestra FC-2, FC-3 y FC-4 (ver Cuadro 5).

Cuadro 5

Eventos reportados, enero 2024 a mayo 2025

Filtro	Sub-unidad	Componente/Item mantenible	Pieza
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios
FC-3	Aire de prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios
FC-3	Estructural	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-4	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo
FC-2	Alimentación de pulpa	Válvulas	Válvulas: Control y monitoreo a
FC-4	Aire de secado	Válvulas	Válvulas: Control y monitoreo a
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Alimentación de pulpa	Válvulas	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Hidráulico	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo
FC-4	Lavado de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Estructural	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo
FC-2	Aire de secado	Dispositivo de entrada	Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Lavado de queque	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-3	Aire de prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios
FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo
FC-2	Control	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Control	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos
FC-2	Aire de secado	Válvulas	Válvulas: Accionado
FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo

Nota. El cuadro muestra los eventos reportados en el periodo enero 2024 a mayo 2025, clasificados según la norma ISO 14224:2016.

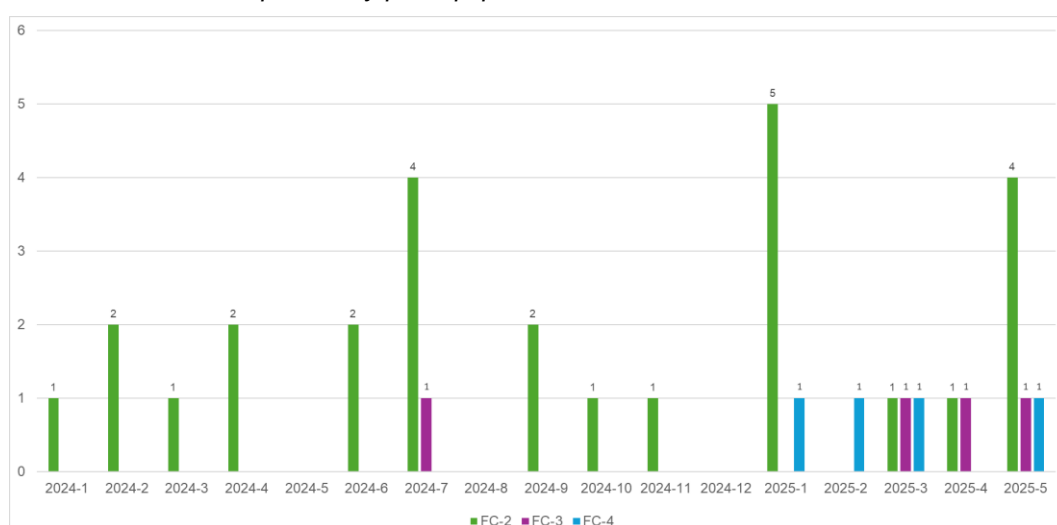
Los eventos han sido clasificados de acuerdo con la subunidad, componente y pieza reportada. Dentro del periodo y la muestra analizada, no se han presentado eventos para todas las subunidades del equipo, siendo

algunas de las subunidades las que presentan mayor cantidad de eventos, así como algunos equipos con la mayor tasa de eventos. En el cuadro 5 se observa el detalle por cada filtro de la muestra, con su respectiva clasificación por subunidad, componente y pieza de acuerdo con los eventos reportados y analizados, siendo la clasificación tomada de la norma ISO 14224.-2016, y enfocada para los componentes y sistemas que presenta el equipo.

La cantidad de eventos reportados en el periodo de estudio presentan una distribución no uniforme, como se observa en la figura 7, siendo el filtro FC-2 con mayor cantidad de eventos (27 eventos), mientras que los filtros FC-3 y FC-4 presenta la misma cantidad de eventos (4 eventos cada uno).

Figura 7

Cantidad de eventos por mes y por equipo



Nota. El gráfico representa la cantidad de eventos por equipo, notándose gran parte de eventos correspondientes al equipo FC-2.

En el cuadro 6 se muestran los repuestos y costos de los materiales asociados para cada evento correctivo. Se presentan eventos en los cuales no se ha requerido cambio de componentes, sólo seteos, reconfiguraciones, o limpiezas mecánicas para reestablecer las condiciones de operatividad. De los repuestos observados se tienen sensores y cableados como los principales repuestos en ser reemplazados en el periodo de estudio.

Asimismo, los costos del repuesto utilizado o requerido ante algún de falla deben ser evaluados para comparar el impacto en la producción al tener o no tener el repuesto disponible en planta. Los repuestos al ser configurados o diseñados para por el fabricante especialmente para los equipos, debe considerarse que se pueda contar con los stocks necesarios. En los eventos revisados no se tuvo eventos en los cuales el equipo quedara completamente fuera de operación por la falta de un repuesto.

Cuadro 6

Repuestos y costos de repuestos usados en correctivos reportados.

Fecha	Filtro	Sub-unidad	Componente/ítem mantenible	Pieza	Repuesto	Costo estimado de repuesto
27/05/2025	FC-3	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
13/05/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
10/05/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Encoder	\$ 2,229.00
9/05/2025	FC-4	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Sensor Cable	\$ 2,141.00
8/05/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	---	\$ -
1/05/2025	FC-2	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
16/04/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	Encoder	\$ 2,229.00
13/04/2025	FC-3	Aire de prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	---	\$ -
30/03/2025	FC-3	Estructural	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Sensor	\$ 312.00
3/03/2025	FC-4	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	---	\$ -
2/03/2025	FC-2	Alimentación de pulpa	Válvulas	Válvulas: Control y monitoreo a	Sensor	\$ 181.00
6/02/2025	FC-4	Aire de secado	Válvulas	Válvulas: Control y monitoreo a	---	\$ -
20/01/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	---	\$ -
20/01/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
20/01/2025	FC-2	Alimentación de pulpa	Válvulas	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Cable	\$ 30.00
18/01/2025	FC-2	Hidráulico	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	---	\$ -
9/01/2025	FC-4	Lavado de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Flujómetro	\$ 5,616.00
9/01/2025	FC-2	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Sensor Cable	\$ 361.00
29/11/2024	FC-2	Estructural	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Sensor Cable	\$ 300.00
15/10/2024	FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Control	\$ 3,292.00
16/09/2024	FC-2	Aire de secado	Dispositivo de entrada	Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
12/09/2024	FC-2	Lavado de queque	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Cable	\$ 30.00
29/07/2024	FC-2	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
26/07/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Sensor	\$ 1,595.00
25/07/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
3/07/2024	FC-3	Aire de prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	Conector Switch	\$ 40.00
3/07/2024	FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Pulsador	\$ 715.00
9/06/2024	FC-2	Control	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
4/06/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Sensor	\$ 457.00
8/04/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
5/04/2024	FC-2	Control	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
29/03/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
15/02/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	---	\$ -
9/02/2024	FC-2	Aire de secado	Válvulas	Válvulas: Accionado	---	\$ -
22/01/2024	FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Switch Pulsador	\$ 715.00

Nota. El cuadro muestra los eventos reportados en el periodo enero 2024 a mayo 2025, considerando la fecha de las intervenciones y los repuestos utilizados.

IV.5 Análisis estadístico

IV.5.1 Mantenimientos y disponibilidad

Para el periodo de estudio, la estrategia actual de mantenimiento ha dado como resultado la disponibilidad por planta para el periodo de estudio mostrada en el cuadro 7. Las disponibilidades obtenidas por planta, considerando que en la planta 1 están los filtros FC-1 de 10 placas y no considerado en la muestra, y el filtro FC-2 de 16 placas. Similarmente, en la planta 2 se encuentran los filtros FC-3 y FC-4, cada uno de 16 placas.

Cuadro 7

Disponibilidad por planta, enero 2024 a mayo 2025

Fecha	Disponibilidad	
	Planta 1 FC-1 y FC-2	Planta 2 FC-3 y FC-4
May. - 25	90.62%	95.51%
Abr. - 25	86.42%	95.14%
Mar. - 25	88.93%	96.53%
Feb. - 25	85.69%	97.21%
Ene. - 25	89.38%	90.86%
Dic. - 24	96.44%	97.59%
Nov. - 24	84.99%	88.68%
Oct. - 24	93.31%	89.43%
Set. - 24	92.72%	93.40%
Ago. - 24	87.48%	92.79%
Jul. - 24	93.74%	96.05%
Jun. - 24	90.52%	91.93%
May. - 24	96.68%	89.86%
Abr. - 24	93.63%	89.51%
Mar. - 24	90.24%	95.51%
Feb. - 24	89.90%	93.03%
Ene. - 24	95.10%	94.34%

Nota. El cuadro muestra las disponibilidades de las plantas en el periodo enero 2024 a mayo 2025. Tomado de reportes mensuales de disponibilidad.

De acuerdo con lo revisado en el cuadro 7, la menor disponibilidad obtenida en ambas plantas corresponde al mes de noviembre 2024 con 84.99

% y 88.68 %, con motivo de la parada general de planta, seguida en la planta 1 por el mes de febrero 2025 con 85.69 % y en la planta 2 por el mes de octubre 2024 con 89.43 %. La mayor disponibilidad obtenida en la planta 1 corresponde al mes de mayo 2024 con 96.68 %, seguida por el mes de diciembre 2024 con 96.44 %; mientras que la mayor disponibilidad en la planta 2 corresponde al mes de diciembre 2024 con 97.59 %, seguida del mes febrero 2025 con 97.21 %.

En el mismo periodo, con la estrategia actual se han obtenido los porcentajes mostrados en cuadro 8 correspondientes al mantenimiento programado y no programado, siendo los valores expresados en porcentajes respecto al tiempo total de mantenimiento utilizado. Los tiempos de mantenimiento consideran el tiempo de mantenimiento mecánico y eléctrico-electrónico.

Cuadro 8

Porcentaje estimado de mantenimiento no programado y programado, enero 2024 a mayo 2025

Fecha	Mantenimiento no programado			Mantenimiento programado		
	FC-2	FC-3	FC-4	FC-2	FC-3	FC-4
May. - 25	78.08%	74.00%	55.00%	21.92%	26.00%	45.00%
Abr. - 25	82.15%	84.00%	79.00%	17.85%	16.00%	21.00%
Mar. - 25	65.44%	74.00%	63.00%	34.56%	26.00%	37.00%
Feb. - 25	30.81%	76.00%	86.00%	69.19%	24.00%	14.00%
Ene. - 25	75.38%	75.00%	82.00%	24.62%	25.00%	18.00%
Dic. - 24	43.77%	62.00%	45.00%	56.23%	38.00%	55.00%
Nov. - 24	6.90%	9.00%	16.00%	93.10%	91.00%	84.00%
Oct. - 24	42.83%	5.00%	73.00%	57.17%	95.00%	27.00%
Set. - 24	22.92%	76.00%	77.00%	77.08%	24.00%	23.00%
Ago. - 24	17.05%	41.00%	59.00%	82.95%	59.00%	41.00%
Jul. - 24	11.63%	75.00%	93.00%	88.37%	25.00%	7.00%
Jun. - 24	16.89%	42.00%	54.00%	83.11%	58.00%	46.00%
May. - 24	14.44%	3.00%	50.00%	85.56%	97.00%	50.00%
Abr. - 24	31.32%	44.00%	19.00%	68.68%	56.00%	81.00%
Mar. - 24	5.40%	91.00%	59.00%	94.60%	9.00%	41.00%
Feb. - 24	13.60%	53.00%	22.00%	86.40%	47.00%	78.00%
Ene. - 24	38.93%	27.00%	19.00%	61.07%	73.00%	81.00%

Nota. El cuadro muestra los porcentajes de mantenimientos no programados y mantenimientos programados por equipo en el periodo enero 2024 a mayo 2025. Tomado de reportes mensuales de disponibilidad.

Los meses con mayor porcentaje de mantenimiento no programado corresponden para el FC-2 al mes de abril 2025 con 82.15 %, seguido del mes de mayo 2025 con 78.08 %; para el FC-3 al mes de marzo 2024 con 91.00 %, seguido del mes de abril 2025 con 84.00 %; y para el FC-4 al mes de julio 2024 con 93.00 %, seguido del mes de febrero 2025 con 86.00 %.

IV.5.2 Eventos reportados

Para los 35 eventos analizados y reportados en el ERP y en los reportes diarios de mantenimiento, se han revisado la información disponible para cada subunidad, componente y pieza obteniéndose los mecanismos y causas de falla indicadas en el anexo 1 y anexo 2.

De los eventos analizados, el subsistema que presenta mayores eventos es el de conducción y tensión de tela, con 7 eventos que representan el 20% de eventos del total. El componente con mayor cantidad de eventos corresponde a los dispositivos de entrada, con el 49% de eventos, siendo la pieza con mayor cantidad de eventos los sensores y equipos electrónicos con 37% de los eventos. El mecanismo de falla más recurrente ha sido la falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma defectuosa con un 23% de los eventos, y la causa mayormente indicada es como desconocida, principalmente debido a la falta de información o detalle en los reportes.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

V.1 Presentación y análisis de resultados

Se ha decidido iniciar con la aplicación de una metodología de mantenimiento preventivo basado en las actividades correctivas analizadas bajo la norma ISO 14224 (ver Cuadro 5 y Cuadro 6) porque se ha identificado que al momento de los eventos la información de reportada de fallas carece de detalles que pueden ser relevantes para la aplicación de metodologías más precisas.

Adicionalmente, los equipos considerandos en el estudio presentan diferentes antigüedades por lo cual una aplicación inicial de un plan de mantenimiento estándar y posterior análisis de resultados podrá determinar el requerimiento de cambio de equipo por el fin de ciclo de vida, o la aplicación de un overhaul que pueda reducir los índices de fallas presentadas para los equipos de mayor antigüedad o que puedan presentar un mayor índice de eventos de fallas.

Se resalta que la metodología considerada para ser aplicada podrá ser actualizada más adelante para integrar o cambiarla por otras metodologías como TPM en la cual se debe tener un mayor acercamiento con el área operativa para poder llevar a cabo el mantenimiento desde la operación, RCM en la cual se requerirá el análisis de criticidad y priorización del equipo por el cual pueda evaluarse que los equipos en estudio puedan tener menor criticidad frente a otros equipos dentro del proceso productivo por lo cual su énfasis en el mantenimiento pueda verse relegado, o CBM en el cual deberían aplicarse la implementación de herramientas para el monitoreo de condición lo cual deberá conllevar a un análisis costo-beneficio para verificar el beneficio de la implementación. Se podrá considerar los resultados de la

aplicación inicial sobre los tiempos de disponibilidad y los costos; así mismo se deberá considerar en una reevaluación la inclusión de indicadores adicionales como los de seguridad (de personas y de equipos), indicadores ambientales como la recuperación de agua, indicadores de cumplimiento de mantenimiento como los de cumplimiento de los programas semanales y anuales y los de cumplimiento del plan, e incluir los índices de backlog, trabajos pendientes, tiempos medio de reparación del equipo (MTTR), contemplando que puede reflejarse en el presupuesto operativo y en el presupuesto de capital del área de mantenimiento.

Para la aplicación se ha revisado y analizado la información del fabricante y de los eventos reportados en el periodo de estudio (ver anexo 3), para los cuales se ha diseñado un listado de trabajos y un plan de mantenimiento enfocado en la parte de instrumentación de los equipos.

V.1.1 Listado de actividades

De la revisión de las actividades sugeridas por el fabricante, de las actividades que actualmente se realizan de manera preventiva, así como de las actividades correctivas en el periodo de análisis, se ha podido bosquejar un listado de actividades recomendadas para el mantenimiento de los filtros (ver Cuadro 9). El listado presenta las actividades sugeridas, el tipo de actividad, el estado de operación del equipo, la frecuencia sugerida de ejecución, la duración estimada, e información adicional a considerar para realizar la actividad.

Para el listado de actividades propuesto se ha considerado como frecuencia el tiempo; sin embargo, para estos equipos también puede considerarse como equivalente los ciclos de trabajo, la cual es una unidad usual de medida de estos equipos siendo un aproximado para un año de trabajo 30,000 ciclos de trabajo u operación. Esta información deberá ser considerada en el ERP o CMMS, de acuerdo con el software que utilice el área de mantenimiento.

Entre el tipo de actividades indicadas se presentan principalmente inspecciones y cambios de componentes por desgaste frecuente; calibración

de sensores por daños por cambios de componentes por otras áreas ya que se observa la recurrencia de eventos correctivos en instrumentación ante intervenciones del área operativa y mecánica. Los cambios de componentes están alineados al mantenimiento mecánico, las cuales suelen durar mayor cantidad de horas en comparación con las actividades de instrumentación, con el fin de aprovechar los tiempos de parada por mantenimiento del equipo, y considerando que se realice una coordinación previa para evitar interferencias. La finalidad de alinear las paradas es la de poder considerar mejores tiempos de disponibilidad operativa de equipos.

Cuadro 9

Listado de actividades

LISTADO DE ACTIVIDADES								
Equipo: Filtro prensa			Responsable:					
Código: ☐ FC-2 ☐ FC-3 ☐ FC-4								
Tipo de mantenimiento	Tipo de actividad	Componente	Estado de equipo	Frecuencia	Duración estimada (horas)	Recursos		Comentario
						Personas	Repuestos	
MPR	Inspección	Alarmas	Operando	Diaria	0.5	1	Ninguno	
MPR	Inspección	Interruptores de parada de emergencia	No operando	Semanal	1	1	Ninguno	
MPR	Inspección	Interruptores de posición	No operando	Semanal	1	1	Ninguno	
MPR	Inspección	Interruptores de presión	No operando	Mensual	1	1	Ninguno	
MPR	Inspección	Accionadores de válvulas	No operando	Semestral	1	1	Ninguno	
MPR	Ajuste, calibración	Sensor de posición: angulímetro, encoder, grampa	No operando	Semestral	2	2	Ninguno	Con cambio de tela
MPM	Inspección	Medidor de flujo	Operando	Semestral	1	1	Ninguno	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Sensor de desplazamiento de placas	No operando	Anual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Sensor de desalineamiento de tela	No operando	Anual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Inspección	Cableado	No operando	Anual	8	1	Ninguno	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Internal End Link	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	External End Link	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Inductive Switch	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Wheel	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Energy Chain	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Pressure Transmitter B415, B419	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Wheel	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Transmitter B534 Cake gauge	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Emergency Stop Button	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Impulse Detector	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Cable with Plug	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Sensor B503, B505	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
MPM	Cambio	Limit Switch	No operando	Bianual	1	2	X	En coordinación con mantenimiento mecánico
Tipo de mantenimiento:		Tipo de actividad:		Estado de equipo		Frecuencia:		
MPR Mantto. preventivo rutinario		INS Inspección		0 No operando		1 Diaria		
MPM Mantto. preventivo mayor		LMP Limpieza		1 Operando		7 Semanal		
		AJS Ajuste, calibración				14 Quincenal		
		CMB Cambio				28 Mensual		
						180 Semestral		
						360 Anual		
						720 Bianual		
						Condición		

Nota. El cuadro muestra la lista de actividades resultante, considerando frecuencia, recursos y consideraciones adicionales para la programación.

V.1.2 Plan de mantenimiento

Para el diseño del plan de mantenimiento, se ha tomado en cuenta el listado de trabajos preparado en el cuadro 9. Asimismo, se ha considerado la frecuencia y duración de mantenimientos preventivos rutinarios y de mantenimientos preventivos mayores, con lo cual se ha diseñado el plan de mantenimiento que se muestra en el anexo 5.

En el plan se muestra las horas de mantenimiento del equipo, así como las horas en las cuales el equipo estaría fuera de operación, por lo cual estas horas deberán ser usadas para los cálculos de disponibilidad planeada y de producción, considerando otros equipos de planta que puedan verse afectados.

El plan de mantenimiento se considera el tipo de mantenimiento a ejecutarse, la actividad, el estado de operación del equipo, la frecuencia y duración de la ejecución. El alcance del plan toma en cuenta una frecuencia desde un día hasta dos años, con intervalos semanales y mensuales, con ello se plantea las actividades rutinarias de inspecciones hasta los mantenimientos mayores.

Los correctivos mayores como cambio de cableado integral, o up-grades como cambio de unidades de control por obsolescencia no están consideradas, estando su inclusión sujeta a evaluación de acuerdo con los reportes de las inspecciones realizadas ya que este tipo de intervenciones no suele ser rutinarias.

Es importante que se pueda tener la retroalimentación de las inspecciones realizadas y de las actividades de mantenimiento mayores, para evaluar planificar, programar y ejecutar un overhaul al equipo, o actividad correctiva mayor, y poder devolverle al activo su capacidad de operación considerando los años de operación del equipo. La información de la retroalimentación también es importante para evaluar el reemplazo del activo por ciclo de vida.

Cuadro 10

Plan de mantenimiento

[illegible]

Nota. El cuadro muestra el plan de mantenimiento resultante organizado por semanas.

V.1.3 Costos

En promedio cada ciclo de filtrado se realiza en 15 minutos, siendo el tonelaje promedio estimado para un filtro de 16 placas de 10 toneladas de concentrado por ciclo, por lo cual por hora y bajo condiciones normales de operación se podrían realizar 4 ciclos de filtrado y por ende se podrían producir 40 toneladas de concentrado de cobre.

Considerando un costo promedio estimado de USD 9,403.00 por tonelada de cobre, promedio entre el precio del cobre durante el periodo de investigación, se tendría por hora operada un promedio de producción de USD 37,610.16 por filtro. El tiempo promedio de parada de equipo para reparación para fallas de instrumentación es de 2 horas, con lo cual se dejan de realizar 8 ciclos de trabajo, y con ello de producir 80 toneladas y USD 75,220.30 en concentrado

Teniendo en cuenta que las actividades planteadas en el plan de mantenimiento puedan realizarse en paralelo con el mantenimiento mecánico, se estima una reducción en el tiempo fuera de disponibilidad del equipo de 2 horas, siendo el impacto en la disponibilidad por día del 8%.

Cuadro 11

Precio del cobre

Año	Promedio estimado de precio de cobre por TM (USD)
2024	9,173
2025	9,632

Nota. El cuadro el precio del cobre en el periodo 2024-2025

Los costos de los repuestos frecuentemente usados oscilan entre USD 30.00 y 5,616.00, con lo cual mantener el repuesto en stock y realizar el cambio de manera preventiva sería económicamente rentable con el tiempo que se tendría el equipo disponible y con la producción de concentrado que se podría producir al realizar los cambios preventivos durante paradas programadas.

CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN

La implementación del plan de mantenimiento requerirá de la participación y compromiso de los involucrados, tanto por la parte operativa como por la parte de mantenimiento a todos los niveles, tanto de toma de decisiones como de planificación y de ejecución. Asimismo, se requerirá establecer una comunicación fluida entre las diferentes disciplinas de mantenimiento, por ejemplo, con mantenimiento mecánico, para poder coordinar intervenciones y acciones conjuntas con el fin de mejorar la disponibilidad de los equipos.

El impacto de la implementación podría verse reflejado en indicadores de mantenimiento, a corto y mediano plazo, dependiendo de las actividades a ser realizadas, siendo de importancia la retroalimentación de los resultados para captar las mejores prácticas de mejora.

La comunicación y retroalimentación con el fabricante del equipo será determinante para revisar e implementar mejoras en los equipos, tanto por parte del diseño como por parte de mejoras en componentes que involucren ámbitos de mantenimiento, producción y seguridad. El fabricante del deberá ser como un ente centralizador de información y buenas prácticas entre diferentes usuarios de filtros prensa.

La evaluación correspondiente para determinar el fin del ciclo de vida útil deberá ser realizada en conjunto por el propietario del bien, área operativa, como por el área de mantenimiento, con el objetivo de realizar una correcta evaluación por un incremento de fallas, y por tanto de costos operativos, costos de repuestos y pérdida de producción, que puedan justificar el reemplazo del activo.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 Conclusiones

- La información correspondiente a los eventos reportados no tiene un detalle específico de las causas de los eventos, siendo el enfoque de muchos reportes el requerimiento de cambio y suministro de repuestos.
- Es necesaria la retroalimentación para las tareas de mantenimiento por parte del personal ejecutor, con el fin de identificar falencias en los planes, y puntos de mejora.
- Se observa una mayor cantidad de fallas para el equipo con mayor antigüedad, por lo cual se deberá hacer un mayor seguimiento para determinar un posible fin de vida útil.
- La elaboración, evaluación y actualización de la lista de trabajos para su posterior implementación en el plan de mantenimiento podrá influir positivamente en la reducción de paradas no programadas por correctivos, así como en la disponibilidad.
- Se observa la importancia de poder evaluar y establecer una estrategia de mantenimiento adecuada para los filtros de cobre, y con la cual las partes involucradas puedan estar comprometida.

VII.2 Recomendaciones

- Se requiere el reporte detallado de todos los eventos, en donde se pueda indicar las causas de la falla e información relevante

respecto a herramientas, repuestos, y personal involucrado en las actividades.

- Es necesario el uso adecuado de sistemas de soporte como ERPs o CMMS, en donde se pueda centralizar la información del mantenimiento, para posteriores análisis.
- Se requiere la capacitación y motivación a personal operativo y de mantenimiento en el uso de herramientas de reporte, así como de identificación de fallas.
- Se debe evaluar planes específicos de acuerdo con la antigüedad de los equipos, evaluando realizar overhaul o mantenimientos mayores por tiempo de operación, por eventos pudiesen acortar la vida útil de los filtros.
- Se debe evaluar el ciclo de vida de los equipos, y con ello poder preparar los cambios con anticipación ya que los reemplazos de estos equipos corresponden a presupuestos capitalizables y teniendo en cuenta que un reemplazo completo tiene una duración de meses o años tanto para el suministro como para el reemplazo en planta.
- Cuando se tienen varios equipos similares, se debe considerar la compatibilidad en repuestos, para poder realizar una mejor gestión de recursos.

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

Cuadrado C., L. A. (2022). Plan de mantenimiento del sistema electrónico mediante el análisis de criticidad para incrementar la disponibilidad mecánica del equipo Alpha 20.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8683>

Flores P., L. G. (2023). Diseñar e implementar un plan de mantenimiento basado en RCM mantenimiento centrado en confiabilidad para equipos críticos en una cementera del Sur del país.
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/56347c62-79fb-426d-8ef0-52771ec6c419>

Gulati, R. (2021). Maintenance and Reliability Best Practices. Industrial Press.

International Monetary Fund (s2025, 08 de octubre) *IFM Primary Commodity Prices*. <https://www.imf.org/-/media/files/research/commodityprices/monthly/table3.pdf>

Larox (2004). Manual de operación y mantenimiento.

Manríquez, V. D. (2021) Taller BOK en Mantenimiento y Confiabilidad - Examen CMRP. AMB Capacitación corporativa

Metso (2024). Larox® PF filter brochure.

Metso (2017). Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento. Planta de deshidratación. Filtración. Filtro Outotec PF60.

Metso Outotec. (2022, 10 de enero). *How automatic Larox® pressure filters can transform starch production*. Metso Outotec.

<https://www.metso.com/insights/e-books/transforming-starch-processes-with-automatic-pressure-filters/>

Mora G., L. A. (2009). Mantenimiento, planeación, ejecución y control. Alfaomega.

Organización Internacional de Normalización. (2016). Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016).

Outotec (2017). Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento.

Palmer, R. D. (2006) Maintenance Planning and Scheduling Handbook. McGraw-Hill Companies

Peltonen, K. (2024). *Development of preventive maintenance for Larox filters* [Master's thesis, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT]. LUTPub.

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/168996/Master%27s%20Thesis_Peltonen_Kaisa.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pincirolì, L., Baraldi, P., & Zio, E. (2023). *Maintenance optimization in industry 4.0. Reliability Engineering & System Safety*, 234, 109204. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109204>

Roque V., M. A. (2022). Mantenimiento preventivo y predictivo de filtro Larox aplicando análisis de fallas Weibull para optimizar tiempos de operación. <https://repositorio.unsa.edu.pe/bitstreams/f7aa51c2-60e7-4c83-8315-6b616fcb3fa5/download>.

Southern Copper Corporation (2025, 04 de marzo). *Annual report pursuant to section 13 or 15(d) of the securities exchange act of 1934*. Superintendencia de mercado de valores. <https://www.smv.gob.pe/ConsultasP8/temp/FORM%2010-K%202024.pdf>

Tecsup (2016). Planificación y Programación del Mantenimiento.

Torvela, V. (2023). *Laroxien ennakkohuoltosuunnitelma ja kunnonvalvonta* [Bachelor's thesis, Metropolia Ammattikorkeakoulu]. Theseus.

https://www.theseus.fi/bitstream/10024/794876/2/Torvela_Valtteri.pdf

CAPÍTULO IX. ANEXOS

Anexo 1. Mecanismos de falla según ISO 14224:2016

Mecanismo de falla		Subdivisión del mecanismo de falla		Descripción del mecanismo de falla
Número de código	Notación	Número de código	Notación	
1	Falla mecánica	1.0	General	Falla relacionada a algún defecto mecánico, pero donde no se conocen detalles mayores.
		1.1	Fuga	Fugas externas e internas, ya sean de líquidos o gases: si el modo de falla al nivel del equipo se codifica como "fuga", se debe utilizar un mecanismo de falla orientado a la causa siempre que sea posible.
		1.2	Vibración	Vibración anormal: Si el modo de falla al nivel del equipo es "vibración", un mecanismo de falla orientado a la causa, la causa de la falla (causa raíz) debe ser registrado siempre que sea posible.
		1.3	Alineamiento/ espacio	Falla provocada por un espacio o alineamiento inadecuado.
		1.4	Deformación	Distorsión, flexión, abolladura, mellas, exceso de tensión, contracción, formación de ampollas, reptación, etc.
		1.5	Soltura	Desconexión, ítems sueltos.
2	Falla de material	1.6	Atascamiento	Atascamiento, agarrotamiento, bloqueo por razones aparte de la deformación o problemas de alineamiento/espacio.
		2.0	General	Falla relacionada a un defecto del material, pero donde no se conocen detalles mayores.
		2.1	Cavitación	Relevante para los equipos tales como las bombas y válvulas
		2.2	Corrosión	Todo tipo de corrosión, tanto húmeda (electroquímica) como seca (química)
		2.3	Erosión	Desgaste por erosión
		2.4	Desgaste	Desgaste abrasivo y adhesivo, p.ej. ralladuras, engrane, raspado, frotamiento
		2.5	Rotura	Fracturas, quebrantamientos, grietas
		2.6	Fatiga	Si la causa de la falla puede ser trazado a la fatiga, se debe utilizar este código.
		2.7	Sobrecalentamiento	Daños al material debido al sobrecalentamiento/ quemado
		2.8	Estallido	Ítem estallido, reventado, explosión, implosión, etc.
3	Falla de instrumentos	3.0	General	Falla relacionado al instrumento, pero donde no se conocen detalles mayores.
		3.1	Falla de control	Falta de regulación o regulación inapropiada
		3.2	Sin señal/ indicación/ alarma	Falta de señal/indicación/alarma esperada
		3.3	Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Señal/indicación/alarma inapropiada en relación al proceso real. Puede ser falsa, intermitente, oscilante, arbitraria
		3.4	Desajuste	Error de calibración, cambio de parámetros
		3.5	Error de software	Falta de control/monitoreo/operación, control/monitoreo/operación inapropiada debido a error de software
		3.6	Falla de causa común/modo común	Varios instrumentos fallaron simultáneamente, p.ej. detectores de incendio y gas redundantes; también fallas relacionadas a una causa común.
4	Falla eléctrica	4.0	General	Fallas relacionadas al suministro y transmisión de energía eléctrica, pero donde no se conocen detalles mayores.
		4.1	Cortocircuito	Cortocircuito
		4.2	Circuito abierto	Desconexión, interrupción, cable roto
		4.3	Sin energía/voltaje	Suministro de energía eléctrica faltante o insuficiente
		4.4	Energía/voltaje inapropiado	Suministro de energía eléctrica inapropiado, p.ej. exceso de voltaje
5	Influencia externa	4.5	Falla de puesta a tierra/ aislamiento	Falla de puesta a tierra, baja resistencia eléctrica
		5.0	General	Failure debido a algún evento externo o sustancia fuera del límite, pero donde no se conocen detalles mayores.
		5.1	Bloqueo/ taponamiento	Restricción/taponamiento de flujo debido a incrustaciones, congelamiento, aseguramiento de flujo (hidratos) etc.
		5.2	Contaminación	Fluido/gas/superficie contaminado, p.ej. contaminación de aceite de lubricación, contaminación del cabezal del detector de gas
6	Varios ^{a, b}	5.3	Otra influencia externa	Objetos externos, impactos, influencia ambiental desde sistemas cercanos
		6.0	General	Mecanismo de falla que no entre en las categorías anteriores
		6.1	Ninguna causa encontrada	Falla investigada, pero no se reveló la causa o existe demasiada incerteza
		6.2	Causas combinadas	Varias causas: Si existe una causa predominante, esta debe ser codificada.
		6.3	Otros	Sin código aplicable: Utilizar texto libre.
		6.4	Desconocido	No existe información disponible

a La persona responsable de adquirir los datos debe juzgar cuál de los descriptores de mecanismo de falla es más importante si existe más de uno, intentando evitar los códigos 6.3 y 6.4.

b Los errores humanos no están considerados bajo los mecanismos de falla, sino que se consideran como parte de las causas de falla.

Nota. El cuadro muestra los mecanismos de falla según la norma: ISO 14224-2016. Adaptado de *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016)* (p. 180-181), 2016, BSI.

Anexo 2. Causas de falla según ISO 14224:2016

Número de código	Notación	No. Código de subdivisión	Subdivisión de la causa de falla	Descripción de la causa de falla
1	Causas relacionadas al diseño	1.0	General	Diseño o configuración inapropiada del equipo (forma, tamaño, tecnología, configuración, operabilidad, mantenibilidad, etc.), pero no se conocen mayores detalles.
		1.1	Capacidad inapropiada	Dimensiones/capacidad inadecuada.
		1.2	Material inapropiado	Selección de materiales inapropiados.
2	Causas relacionadas a la fabricación/ instalación	2.0	General	Falla relacionada a la fabricación o instalación, pero no se conocen mayores detalles.
		2.1	Falla de fabricación	Falla de fabricación o procesamiento
		2.2	Falla de instalación	Falla de instalación o montaje (no incluye montaje después de mantenimiento)
3	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento	3.0	General	Falla relacionada a la operación/uso o mantenimiento del equipo, pero no se conocen mayores detalles.
		3.1	Servicio no provisto/ no diseñado	Condiciones de servicio imprevistas o no diseñadas, p.ej. operación del compresor fuera del rango apropiado, presión mayor a las especificaciones, etc.
		3.2	Error de operación	Error humano: Error, mal uso, negligencia, descuido, etc. durante la operación (ej. debido a fatiga humana)
		3.3	Error de mantenimiento	Error humano: Error, mal uso, negligencia, descuido, etc. durante el mantenimiento (ej. debido a fatiga humana)
		3.4	Desgaste esperado	Falla causada por el desgaste resultante de la operación normal del equipo
4	Falla relacionada a la gestión	4.0	General	Falla relacionada a problemas de gestión, pero no se conocen mayores detalles.
		4.1	Error de documentación	Error humano: Falla relacionada a procedimientos, especificaciones, planos, reportes, etc. (ej. debido a fatiga humana)
		4.2	Error de gestión	Falla relacionada a la planificación, organización, aseguramiento de calidad, etc.
5	Varios ^a	5.0	Varios - general	Causas que no entran en una de las categorías anteriores
		5.1	Ninguna causa encontrada	Falla investigada, pero no encontró una causa específica
		5.2	Causa común	Causa/modo común ^b
		5.3	Causas combinadas	Varias causas actúan simultáneamente. Si existe una causa predominante, esta debe ser codificada.
		5.4	Falla de otra unidad/ en cascada	Falla debido a la falla de otro equipo, sub-unidad o ítem mantenible (falla en cascada)
		5.5	Otros	Sin código aplicable: Utilizar texto libre para registrar causa.
		5.6	Desconocido	No existe información disponible acerca de la causa de falla

^a La persona responsable de adquirir los datos debe juzgar cuál de los descriptores de mecanismo de falla es más importante si existe más de uno, intentando evitar los códigos 5.5 y 5.6.

^b Véase mayor información en B.2.3.2 y también F.3.2.

Nota. El cuadro muestra las causas de falla según la norma: ISO 14224-2016. Adaptado de *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016)* (p. 182-183), 2016, BSI.

Anexo 3. Eventos reportados por fecha, enero 2024 a mayo 2025

#	Fecha	Equipo	Sub-unidad	Componente/tem mantenible	Pieza	Mecanismo de falla	Causa de falla
1	27/05/2025	FC-3	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla mecánica: Fuga	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento
2	13/05/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla mecánica: Fuga	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento
3	10/05/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido
4	9/05/2025	FC-4	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado
5	8/05/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	Varios: Desconocido	Varios: Desconocido
6	1/05/2025	FC-2	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Desajuste	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de operación
7	16/04/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado
8	13/04/2025	FC-3	Aire de prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	Falla de instrumentos: General	Varios: Desconocido
9	30/03/2025	FC-3	Estructural	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: General
10	3/03/2025	FC-4	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido
11	2/03/2025	FC-2	Alimentación de pulpas	Válvulas	Válvulas: Control y monitoreo a	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido
12	6/02/2025	FC-4	Aire de secado	Válvulas	Válvulas: Control y monitoreo a	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido
13	20/01/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	Falla de instrumentos: Desajuste	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento
14	20/01/2025	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de operación
15	20/01/2025	FC-2	Alimentación de pulpas	Válvulas	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Varios: Desconocido
16	18/01/2025	FC-2	Hidráulico	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Falla eléctrica: Circuito abierto	Varios: Desconocido
17	9/01/2025	FC-4	Lavado de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado
18	9/01/2025	FC-2	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado
19	29/11/2024	FC-2	Estructural	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Varios: Desconocido	Varios: Desconocido
20	15/10/2024	FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Falla eléctrica: Energía/voltaje inapropiado	Varios: Desconocido
21	16/09/2024	FC-2	Aire de secado	Dispositivo de entrada	Sensor y equipos electrónicos	Falla eléctrica: General	Varios: Causa común
22	12/09/2024	FC-2	Lavado de queque	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: General
23	29/07/2024	FC-2	Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido
24	26/07/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido
25	25/07/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Desajuste	Varios: Desconocido
26	3/07/2024	FC-3	Aire de prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	Falla de instrumentos: General	Varios: Desconocido
27	3/07/2024	FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado
28	9/06/2024	FC-2	Control	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento
29	4/06/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido
30	8/04/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla eléctrica: Sin energía/voltaje	Varios: Desconocido
31	5/04/2024	FC-2	Control	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: General
32	29/03/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento
33	15/02/2024	FC-2	Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Varios: Ninguna causa encontrada	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado
34	9/02/2024	FC-2	Aire de secado	Válvulas	Válvulas: Accionado	Varios: Causas combinadas	Varios: Desconocido
35	22/01/2024	FC-2	Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Falla de instrumentos: Falla de causa común/modo común	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de operación

Nota. El cuadro muestra los eventos reportados con el análisis de los mecanismos de falla y de causas de falla según la norma: ISO 14224-2016.

Anexo 4. Análisis de eventos reportados, enero 2024 a mayo 2025

Sub-unidad	Componente/ítem mantenible	Pieza	Mecanismo de falla	Causa de falla	Cant. eventos
Aire de prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Varios	Falla de instrumentos: General	Varios: Desconocido	2
Aire de secado	Dispositivo de entrada Válvulas	Sensor y equipos electrónicos	Falla eléctrica: General	Varios: Causa común	1
		Válvulas: Accionado	Varios: Causas combinadas	Varios: Desconocido	1
		Válvulas: Control y monitoreo a	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido	1
Alimentación de pulpa	Válvulas	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Varios: Desconocido	1
		Válvulas: Control y monitoreo a	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido	1
Conducción y tensión de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Desajuste	Varios: Desconocido	1
			Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Varios: Desconocido	3
			Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento	1
				Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de operación	1
			Falla eléctrica: Sin energía/voltaje	Varios: Desconocido	1
			Varios: Ninguna causa encontrada	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado	1
			Falla mecánica: Fuga	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento	2
				Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento	1
			Falla de instrumentos: Desajuste	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento	1
			Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado	1
			Varios: Desconocido	Varios: Desconocido	1
				Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de operación	1
Control	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado	1
			Falla eléctrica: Energía/voltaje inapropiado	Varios: Desconocido	1
			Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento	1
				Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: General	1
	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de mantenimiento	1
Estructural	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: General	1
			Varios: Desconocido	Varios: Desconocido	1
Hidráulico	Conmutadores	Conmutadores: Control protección y monitoreo	Falla eléctrica: Circuito abierto	Varios: Desconocido	1
Lavado de queque	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: General	1
Lavado de tela	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado	1
Placas/prensado	Dispositivo de entrada	Dispositivo de entrada: Sensor y equipos electrónicos	Falla de instrumentos: Desajuste	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Error de operación	1
			Falla de instrumentos: Señal/ indicación/ alarma defectuosa	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado	1
				Varios: Desconocido	1
			Falla de instrumentos: Sin señal/ indicación/ alarma	Causas relacionadas a la operación/ mantenimiento: Desgaste esperado	1

Nota. El cuadro muestra los eventos reportados clasificados según componente/ítem mantenible y piezas.