

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Análisis de trabajos de mantenimiento preventivo en el Sistema de Lubricación para reducir fallas en PADs de molinos de plantas concentradoras que permitan mejorar la Disponibilidad Mecánica”

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico


Elaborado por

Sergio Simion Salas Espiritu

 [0009-0003-7659-401X](#)

Asesor

Ing. Jorge Vera Ermitaño

 [0000-0002-2787-1348](#)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Salas, 2025)
Referencia/Reference	Salas, S. (2025). <i>Mantenimiento Preventivo en los PADs de molinos de Plantas Concentradoras para mejorar la Disponibilidad Mecánica</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres que me formaron en valores y dedicación a la familia y al trabajo.

RESUMEN

El presente Trabajo de Suficiencia analiza una falla catastrófica en los trunnion de los molinos de una planta concentradora de gran minería afectando la disponibilidad mecánica del equipo. El objetivo es incluir en el programa de mantenimiento periódico del molino trabajos que normalmente no son programados por tema de disponibilidad de recursos y falta de tiempo durante el desarrollo de una parada de planta. Se demuestra que la ausencia de un mantenimiento preventivo da lugar a este tipo de fallas, nos apoyamos de un análisis causa raíz para lograr identificar el origen de esta falla. La investigación es de tipo aplicada, de diseño no experimental y la metodología se apoya en un enfoque cuantitativo para la recolección y análisis de datos, utilizando el sistema SAP, PI SYSTEM, AMPLA, RMES. Se dan recomendaciones para incluirlo en el programa de mantenimiento y evitar la recurrencia de estas fallas y evitar el impacto a la disponibilidad del equipo, se prevé que la aplicación de las recomendaciones contribuirá a que el equipo opere dentro de los parámetros del diseñador evitando paradas intempestivas.

Palabras clave - *disponibilidad mecánica, programa de mantenimiento, mantenimiento preventivo, falla catastrófica, sistema SAP, Sistema PI SYSTEM, Sistema AMPLA, Sistema RMES.*

ABSTRACT

This Sufficiency Work analyzes a catastrophic failure in the trunnion rollers of the mills of a large-scale mining concentration plant, affecting the mechanical availability of the equipment. The objective is to include in the mill's periodic maintenance program, works that are not normally scheduled due to resource availability and lack of time during a plant shutdown. It is demonstrated that the absence of preventive maintenance gives rise to this type of failures; we rely on a root cause analysis to identify the origin of this failure. The research is of an applied type, with a non-experimental design, and the methodology is based on a quantitative approach for data collection and analysis, using the SAP, PI SYSTEM, AMPLA, RMES systems. Recommendations are given for including it in the maintenance program to avoid the recurrence of these failures and avoid the impact on equipment availability. It is anticipated that the application of the recommendations will contribute to the equipment operating within the designer's parameters, avoiding untimely shutdowns.

Keywords - *mechanical availability, maintenance program, preventive maintenance, catastrophic failure, SAP system, PI SYSTEM system, AMPLA system, RMES system.*

Tabla de contenido

	Pag
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de tablas.....	viii
Lista de figuras.....	ix
Introducción.....	xii
Capítulo I: Generalidades.....	1
1.1 Antecedentes de la investigación.....	1
1.2 Identificación y descripción del problema de estudio.....	4
1.3 Formulación del problema.....	8
1.3.1 Problema general.....	8
1.3.2 Problema específico.....	8
1.4 Justificación e importancia.....	8
1.4.1 Justificación.....	8
1.4.2 Importancia.....	9
1.5 Objetivos.....	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivo específico.....	9
1.6 Hipótesis.....	10
1.6.1 Hipótesis General.....	10
1.6.2 Hipótesis Específica.....	10
1.7 Variables y Operacionalización de variables.....	10
1.7.1 Variables.....	10
1.7.2 Dimensiones.....	11
1.7.3 Indicadores.....	11
1.7.4 Operacionalización de variables.....	12
1.8 Metodología de la Investigación.....	13
1.8.1 Unidad de Análisis.....	13

1.8.2	Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación.....	13
1.8.3	Diseño de la Investigación.....	14
1.8.4	Fuentes de Información.....	14
1.8.5	Población y Muestra.....	14
1.8.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	14
1.8.7	Análisis y procesamiento de datos.....	14
CAPITULO II. Marco Teórico y Conceptual.....		15
2.1	Bases teóricas.....	15
2.1.1	La Actividad Minera.....	15
2.1.2	Proceso de conminución de mineral.....	16
2.1.3	Planta concentradora de Gran Minería.....	18
2.1.4	Definición de Mantenimiento.....	19
2.1.4.1	Definición de estrategias de Mantenimiento.....	20
2.2	Marco conceptual.....	23
2.2.1	Molino de Planta Concentradora de Gran Minería.....	23
2.2.2	Principio de operación de un molino.....	23
2.2.3	Partes principales de un molino.....	24
2.2.4	Cojinetes de un molino.....	26
2.2.5	Sistema de lubricación hidrostática de un molino.....	26
2.2.6	PADs de un molino.....	28
CAPITULO III. Desarrollo del Trabajo de Investigación.....		29
3.1	Falla catastrófica de PAD en Molino de Bolas 310MLB001 de Minera Las Bambas...29	
3.1.1	Descripción y Datos de diseño del molino de bolas FLSmidth de 26' x 40' 310MLB001.....	29
3.1.2	Parámetros operativos del sistema de lubricación del molino de bolas FLSmidth de 26'x40' 310MLB001.....	31
3.1.3	Descripción de la función de los PADs del molino de bolas FLSmidth de 26' x 40' 310MLB001.....	31

3.1.4	Datos operativos de los PADs que deben ser anotados durante la operación del molino de bolas FLSmith de 26' x 40' 310MLB001.....	32
3.1.5	Distribución de los PADS en los trunnion de alimentación y descarga del molino de bolas FLSmith de 26' x 40' 310MLB001.....	33
3.1.6	Instrumentación del molino incluyendo los trunnion y PADs del molino de bolas FLSmith de 26' x 40' 310MLB001.....	35
3.1.7	Falla catastrófica en PADs del lado de alimentación del molino de bolas 310MLB001.....	36
3.1.7.1	Variables operativas en la zona del trunnion del molino de bolas MLB001.....	36
3.1.8	Análisis ACR de la falla súbita de PADs lado alimentación del molino de bolas MLB001.....	39
Capitulo IV. Resultados, Contrastaciones de Hipótesis y Discusión de Resultados.....		55
4.1	Resultados.....	55
4.2	Contrastaciones de Hipótesis.....	58
4.3	Discusión de Resultados.....	60
Conclusiones.....		61
Recomendaciones.....		62
Referencias Bibliográficas.....		63
Anexos.....		64
Anexo A: Matriz de Consistencia.....		64
Anexo B: Lista de abreviaturas.....		65

Lista de tablas

	Pag
Tabla 1: Disponibilidades del año 2021 en una planta concentradora de 140KTon.....	5
Tabla 2: Indicadores de la variable independiente.....	11
Tabla 3: Operacionalización de variables.....	12
Tabla 4: Principales empresas productoras de cobre en el Perú.....	15
Tabla 5: Clasificación de la actividad minera de acuerdo con su estrato.....	16
Tabla 6: Datos principales del molino de bolas 310MLB001.....	29
Tabla 7: Datos del circuito de lubricación del molino de bolas 310MLB001.....	30
Tabla 8: Parámetros operativos del molino de bolas 310MLB001.....	31
Tabla 9: tabla para anotar parámetros operativos de presión del molino de bolas 310MLB001.....	33
Tabla 10: Resultados de calibración de PADs del molino de bolas 310MLB001.....	56
Tabla 11: Resultados de disponibilidades de equipos en Planta Concentradora de 150Ktpd.....	58
Tabla 12: Matriz de consistencia.....	64

Lista de figuras

	Pag
Figura 1: Representación gráfica de componentes de un molino de bolas.....	1
Figura 2: Representación gráfica de lubricación con bomba externa.....	2
Figura 3: Diagrama de ingreso a presión del lubricante por el PAD para formar la película de aceite.....	3
Figura 4: Falla de PADs por ingreso de material extraño.....	6
Figura 5: Análisis de falla de PADs de alimentación por ingreso de material extraño.....	7
Figura 6: Diagramas de flujo y cadena de valor de las materias primas.....	17
Figura 7: Energía promedio necesarias para operaciones de molienda / concentración.	17
Figura 8: Energía promedio necesarias para operaciones de molienda / concentración.	18
Figura 9: Flow Shett típico de una Planta Concentradora.....	19
Figura 10: Movimiento de la carga dentro del molino.....	24
Figura 11: Partes principales de un molino de bolas FLSMidth de 26'x40'.....	25
Figura 12: Cojinetes del Molino de bolas FLSMidth de 26'x40'.....	26
Figura 13: Circuito de aceite de alta presión de un Molino.....	27
Figura 14: Sistema de alta presión de un molino de bolas.....	27
Figura 15: Distribución de PADs dentro del cojinete de soporte del molino.....	28
Figura 16: Trunnion de molino sobre los PADs del cojinete.....	28
Figura 17: Diagrama de partes de un PAD de molino.....	32
Figura 18: Disposición de PADs del trunnion de alimentación de un molino.....	34
Figura 19: Disposición de PADs del trunnion de descarga de un molino.....	34
Figura 20: Instrumentación del trunnion de un molino de bolas.....	35
Figura 21: Instrumentación de los PADs de un molino de bolas.....	36
Figura 22: Tendencia de temperatura de PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001.....	37
Figura 23: Tendencia de temperatura de PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001.....	37

Figura 24: Tendencia de conteo de partículas en el aceite en el año 2019 del molino 310MLB001.....	38
Figura 25: Muestra de partículas en el sistema de lubricación el día del evento en el molino 310MLB001.....	38
Figura 26: Zona dañada en el PAD 3 del trunnion de alimentación en el molino 310MLB001.....	39
Figura 27: Tendencia de presión en los PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001, previo y día de falla.....	41
Figura 28: Tendencia de presión en los PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001, el día de la falla.....	42
Figura 29: Tendencia de temperaturas en los PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001, el día de la falla.....	43
Figura 30: Tendencia de la corriente del motor comparado con la velocidad del molino del molino 310MLB001, el día de la falla.....	44
Figura 31: Tendencia de la corriente en el motor del molino 310MLB001, el día de la falla.....	46
Figura 32: Tendencia de la presión y temperaturas en los PADs del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla.....	47
Figura 33: Tendencia de viscosidad del aceite hidráulico del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla.....	48
Figura 34: Tendencia del conteo de partículas en el aceite hidráulico del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla.....	49
Figura 35: Tendencia del conteo de partículas de los elementos de desgaste en el aceite hidráulico del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla.....	49
Figura 36: Tendencia del conteo de partículas contaminantes en el aceite hidráulico del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla.....	50
Figura 37: Tendencia de presión y temperatura en los PADs del molino 310MLB001 en el momento de la falla.....	51

Figura 38: Muestras de partículas encontradas en los PADs del molino 310MLB001 en el momento de la falla.....	52
Figura 39: Tendencia de las mediciones de la luz entre el rotor y estator del molino 310MLB001 en el momento de la falla.....	53
Figura 40: Observaciones a la calidad en la fabricación del PAD.....	54
Figura 41: Sello de Trunnion.....	54
Figura 42: Grafica de presiones en los PADs luego de la calibración realizada por FLSmidth en el molino 310MLB001.....	57
Figura 43: Grafica de producción diaria durante el mes de enero 2020 en Minera las Bambas.....	59

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de suficiencia revisa las vulnerabilidades que puede tener un molino de bolas de procesamiento de mineral si es que no se cumple con los trabajos de mantenimiento preventivo descritos en el manual del fabricante.

Las consecuencias de una falla en estos equipos pueden comprometer su integridad, teniendo como consecuencia una detención no programada que afecte sucesivamente a la disponibilidad del equipo, a la cantidad de mineral procesado, al presupuesto de mantenimiento y consecuencias económicas hasta lograr poner en marcha nuevamente al molino.

Las plantas concentradoras de gran minería en el Perú cuentan con estos equipos por lo tanto observar meticulosamente el mantenimiento que corresponde evitará generar pérdidas para la empresa asimismo evitar la exposición de los trabajadores a labores de alto riesgo que implica volver a poner en marcha el molino.

Capítulo I. Generalidades

1.1 Antecedentes de la Investigación

Fresko M (2020) *“How grinding mill design changed over the last 30 years”* sostiene que los molinos son los equipos más importantes en las minas y procesan miles de toneladas de mineral cada hora, la operación continua por 24 horas al día de estos equipos generan ingresos de más de USD \$ 1 millón por día, las detenciones a causa de fallas mecánicas en estos equipos generan perdidas irre recuperables para la compañía.

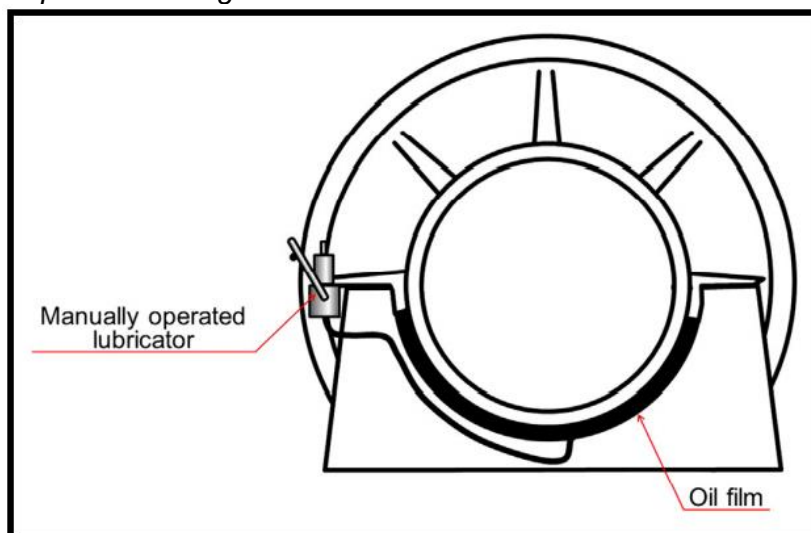
Wills B, (2016) *“Mineral Processing Technology”* indica que los cojinetes de los molinos están fabricados de hierro fundido o acero de alta calidad y se fijan a los molinos mediante pernos. Tienen una superficie bien pulida para reducir la fricción.

La lubricación entre el trunnion y el cojinete será con grasa para molinos pequeños y para molinos grandes el diseño incorpora al aceite hidráulico para la lubricación entre estas dos superficies.

Para el caso de molinos de gran tamaño el aceite es abastecido por bombas de presión positiva externa que generan una película protectora entre el trunnion y el cojinete evitando los daños por fricción. En la figura 1 se muestra el cojinete con la lubricación forzada mediante una bomba externa.

Figura 1

Representación gráfica de lubricación con bomba manual externa



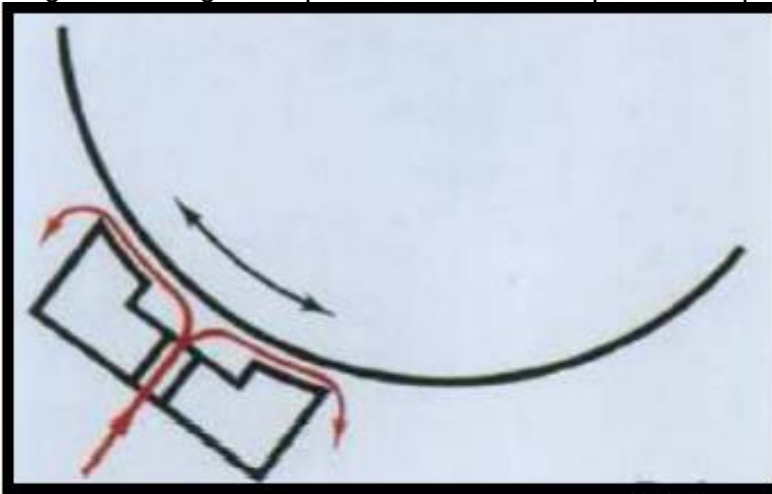
Fuente: Wills B, (2016) *“Mineral Processing Technology”*

Barrios M (2015) *“Optimización de los sistemas de control de un molino de bolas”* describe el principio hidrostático de operación de un PAD en el cojinete de un molino de bolas. El aceite inyectado a presión genera una película de aceite entre el trunnion y el PAD de bronce permitiendo que el molino este libre para rotar en cualquier sentido.

En la figura 2 se muestra un diagrama de un PAD y el ingreso del lubricante a presión para formar la película de aceite.

Figura 2

Diagrama de ingreso a presión del lubricante por el PAD para formar la película de aceite



Fuente: Barrios M, (2015) *“Optimización de los sistemas de control de un molino de bolas”*

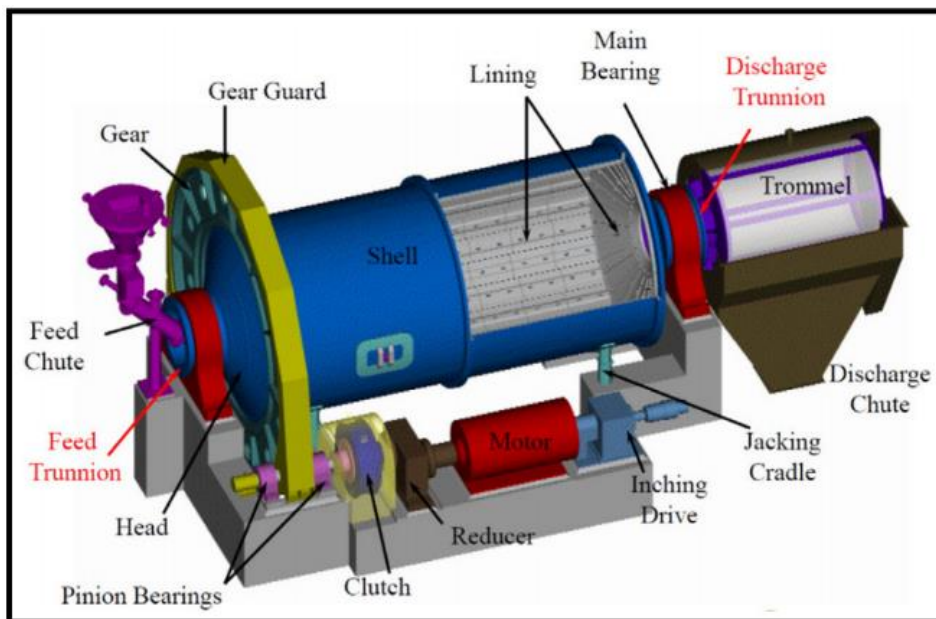
M.D.M. Neves (2014) *“Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants”* La trituración de sólidos tiene varios propósitos, uno de ellos es el beneficio de minerales. El objetivo de la trituración es liberar el mineral de la roca y los métodos de trituración del mineral se clasifican de acuerdo con el tamaño de la roca en chancado y molienda utilizándose equipos de diferentes características para estos procesos.

En el área de molienda los molinos son equipos rotativos de gran tamaño que internamente utilizan bolas como medios de molienda para triturar el mineral. Los trunnion de los molinos son componentes de acero de forma cilíndrica y tubular de paredes gruesas, el mineral pasa por su interior alimentando o descargando el molino, por lo general el trunnion se encuentra unida a la tapa del molino mediante una unión empernada. Los

trunnion de molino están apoyados en dos cojinetes (Main Bearing) tal como se muestra en la figura 3. Los cojinetes son estáticos y están anclados a su base de concreto, el trunnion de alimentación y descarga (Feed Trunnion y Discharge Trunnion) del molino giran sobre estos cojinetes, separados únicamente por una película de aceite. Ambos cojinetes soportan todo el peso del molino en estos dos puntos, trunnion de alimentación y descarga respectivamente.

Figura 3

Representación gráfica de componentes de un molino de bolas



Fuente: M.D.M. Neves (2014) "Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants"

Deza R (2012) "Mantenimiento centrado en la confiabilidad para el sistema de lubricación de un molino SAG de 100,000Ton/día" UNI, nos indica que una falla en el sistema de lubricación de un molino SAG originaría una parada intempestiva de gran impacto en la disponibilidad y en la pérdida de ingresos económicos generados por este equipo. Analiza el impacto negativo generado en dos ocasiones en uno de los molinos instalados en una planta concentradora de gran minería.

Meimaris C, (2011) "On the comparison between measured and calculated stresses in large SAG mills" presenta un estudio del diseño estructural de grandes molinos SAG

donde los rangos de tensión medidos en la estructura cilíndrica y cojinetes del molino se realizan con galgas extensométricas y se comparan con las tensiones calculadas utilizando modelos de elementos finitos. Uno de los factores que influyen en el aumento de la tensión en la estructura de los molinos y por ende la presión en los cojinetes del molino es el aumento del nivel de bolas.

Tejada W (2010) "*Análisis dinámico de Molino SAG*" los cojinetes de alimentación y descarga de los molinos son de vital importancia para el equipo ya que permite su soporte axial y la rotación del molino. Cada cojinete está compuesto por una estructura de acero y cuatro PADs de bronce con aceite inyectado a gran presión. La presión es de 800 Psi aproximadamente y logran el soporte hidrostático del molino durante la rotación de este.

1.2 Identificación y descripción del problema de estudio

Dentro de los programas de mantenimiento de los molinos de plantas concentradoras los fabricantes de estos equipos recomiendan realizar un seguimiento detallado a cada componente del sistema hidrostático de los cojinetes del molino considerándose como un punto crítico e importante del sistema de lubricación del molino.

Los procesos de mantenimiento tienen deficiencias para completar correctamente y con calidad los trabajos programados en el conjunto Trunnion y PADs, asimismo, durante la operación es posible que algunas variables operativas del molino tengan alarmas y se encuentran forzados generando una posibilidad de falla catastrófica en estos componentes.

El KPI más afectado con la falla catastrófica en los cojinetes del molino es la disponibilidad mecánica; la disponibilidad está relacionada proporcionalmente con los planes de producción de la compañía minera. La tabla 1 muestra la disponibilidad del área de molienda en una planta concentradora.

Tabla 1

Disponibilidades del año 2021 en una planta concentradora de 140KTon.

Info Disponibilidad Proyectada @ 2021															
AREA CHANCADO	210/0220	PROCESO DE REVISION												365	OFICIAL
Descripción	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	2021	2021	
Disponibilidad Ampla Línea Chancado Total	94.88%	82.33%	96.84%	90.23%	92.73%	96.88%	90.87%	94.41%	96.88%	90.93%	90.91%	96.91%	92.98%	92.98	
FAJAS OVERLAND															
Horas Programadas	25.0	107.0	8.0	55.5	37.5	7.5	53.0	25.0	7.5	53.0	50.5	7.5	437.0	0.9297717	
Horas Estimadas por Fallas	13.1	11.8	15.5	14.8	16.6	15.0	15.0	16.6	15.0	14.5	15.0	15.5	178.2		
Horas Totales de Detención	38.1	118.8	23.5	70.3	54.1	22.5	68.0	41.6	22.5	67.5	65.5	23.0	615.2		
Horas Limpieza Operaciones	6.0	6.0	0.0	18.0	6.0	0.0	6.0	6.0	0.0	6.0	6.0	0.0	60.0		
AREA MOLIENDA															
Descripción	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SETIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	2021	2021	
Disponibilidad Ampla Línea Molienda Total	97.38%	83.93%	97.24%	94.44%	98.86%	98.82%	82.80%	98.86%	98.82%	94.35%	97.99%	97.78%	95.17%	95.17	
MOLIENDA															
Horas Programadas	6.5	100.0	6.5	36.0	6.5	6.5	124.0	6.5	6.5	36.0	6.5	6.5	348.0	0.9517123	
Horas Estimadas por Fallas	13.0	8.0	14.0	4.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	6.0	8.0	10.0	75.0		
Horas Totales de Detención	19.5	108.0	20.5	40.0	8.5	8.5	128.0	8.5	8.5	42.0	14.5	16.5	423.0		

Fuente: Minera Las Bambas 2021 Área de Planeamiento

Las fallas en los cojinetes del molino están relacionadas a:

- Falla de uno de los componentes del circuito de lubricación.
- Ingreso de material extraño en el circuito de lubricación.
- Falta de regulación de PADs.
- Operación inadecuada de los molinos.
- Eliminar o forzar el control algunas variables de protección de los PADs.

De acuerdo con la magnitud de la falla estas pueden comprometer a otros componentes del molino como al propio trunnion u otras partes estructurales del molino.

El diseño y fabricación de componentes de los molinos SAG y de Bolas de gran minería tienen costos altos y toman plazos de entrega que normalmente alcanzan los algunos años de espera de acuerdo con la demanda del mercado.

Por lo general en los cojinetes de un molino los componentes que fallan son los de sacrificio llamados PADs y/o THRUST PADs, las posibilidades de que la falla abarque componentes mayores como los Trunnion tiene alta probabilidad. El recambio de estas piezas tiene una secuencia de trabajos y toma un tiempo estimado de 120 horas de trabajo continuo.

En la figura 4 se muestra una falla en los PADs de los molinos de bolas donde la causa fue el ingreso de material extraño al circuito de lubricación haciendo contacto con los PADs del lado alimentación del molino., los PADs se dañaron elevando la temperatura normal de operación.

Figura 4:
Falla de PADs por ingreso de material extraño.



Fuente: PAD con falla catastrófica en Minera las Bambas (2020)

Las fallas en los PADs, conducen a la realización de un Análisis Causa Raíz de la falla para determinar sus causas, el impacto en la producción de la Planta Concentradora es muy alta al detener la línea de producción del área de molienda. En la figura 5 se muestra una parte del estudio de Análisis causa Raíz en el caso de la falla mostrada en la figura 4.

Figura 5

Análisis de falla de PADs de alimentación por ingreso de material extraño.

ACR: FALLA SUBITA EN PAD'S DE ALIMENTACIÓN MOLINO 310MLB001

IMPACTOS: Detención de una línea de molienda (molino SAG 310MLS001 y molino de bolas 310MLB001) por 05 días 18 hr, y 2 min. para realizar cambio de 4 PADs del lado alimentación.



LÍNEA DE TIEMPO:

1. 05/01/2020 13:38:00; Corte de energía por descarga atmosférica duración 1.8Hrs.
2. 06/01/2020 09:40:00; ligera disminución de presión en PADs de alimentación, baja la velocidad del molino (11.6 a 11.3RPM) e incremento de corriente (2473 a 2557Amp).
3. 06/01/2020 11:53:00 – 11:57:00; Presión en PAD 4, ligero incremento de presión (100Kpa aprox.)
4. 06/01/2020 11:58:00 – 12:10:00; inicia incremento de temperatura en lado interno izquierdo e interno derecho del Trunnion de alimentación, en 12 min llega a 55°C, generando trip por alta temperatura en Trunnion.
5. 06/01/2020 12:10:00, trip por alta temperatura
6. 06/01/2020 12:23:00 primer arranque
7. 06/01/2020 12:33:00 trip por alta temperatura
8. 06/01/2020 12:41:00, segundo arranque
9. 06/01/2020 13:03:00 Trip por alta temperatura

CAUSAS DE LA FALLA:

1. En proceso de análisis. FLSmidth como vendor del molino realizará el análisis de falla.

CONSECUENCIA:

1. Daño en PADs 3 y 4 de lado alimentación, perdidas de producción.

PLANES DE ACCIÓN:

Corto plazo

1. Reuniones y ACR multidisciplinario.
2. Cambio de 04 PADs lado alimentación.

Largo plazo

1. Implementar Inspecciones periódicas en los PADs de los molinos.
2. Implementar Inspecciones periódicas en los componentes internos del trunnion de los molinos.

Fuente: PAD con falla en Minera Las Bambas (2020)

La problemática que se plantea se refiere al análisis de los trabajos de mantenimiento y parámetros de operación en el sistema de lubricación de los PADs para evitar la pérdida de disponibilidad de los molinos por una falla catastrófica en los PADs de los molinos en las plantas concentradoras de Gran Minería.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema General

¿En qué medida un nuevo Plan de Mantenimiento Preventivo en el sistema de lubricación de los PADs contribuirá a la mejora de la Disponibilidad Mecánica de un Molino de Mineral en una Planta Concentradora de Gran Minería?

1.3.2 Problemas Específicos

- a. ¿De qué manera se establece la prioridad de intervención preventiva en los PADs de los molinos?
- b. ¿De qué manera se puede identificar los problemas en los PADs que afectan la disponibilidad del molino?
- c. ¿Qué estrategia se debe aplicar para disminuir fallas potenciales en los PADs de los molinos?
- d. ¿De qué manera influirá la regulación de PADs en la mejora de disponibilidad mecánica del molino?

1.4 Justificación e importancia

1.4.1 Justificación

La implementación del Mantenimiento Preventivo en los PADs de los molinos es prioritaria debido a la importancia de estos equipos dentro del Proceso de Producción de la Planta Concentradora.

Los molinos procesan todo el mineral proveniente de mina teniendo como resultado la disminución del tamaño del mineral para que este sea liberado y pueda flotar en los siguientes procesos.

Para el procesamiento de mineral en una planta concentradora de gran minería por lo general se dispone en su Flowsheet un molino SAG y dos molinos de bolas. Cualquier detención de estos equipos implica la disminución total o por lo menos la mitad de la capacidad de procesamiento total de molienda.

El Mantenimiento Preventivo en los PADs asegura que los elementos más vulnerables del molino puedan continuar operando dentro de los parámetros normales, por lo tanto, la implementación del Mantenimiento preventivo en los PADs de los molinos se justifica por su potencial de disminuir fallas catastróficas en estos componentes y por consiguiente aumentar la Disponibilidad Mecánica del molino.

1.4.2 Importancia

La importancia del Mantenimiento Preventivo en los PADs de los molinos radica en que se mejore las prácticas de mantenimiento actuales que dan mucha importancia a otros componentes del molino restando tiempo para dedicarlo al Mantenimiento de los PADs. La incorporación de estas prácticas tendrá como consecuencia sistematizar las tareas de mantenimiento de tal forma que los PADs operen con la mayor confiabilidad evitando paradas largas para reemplazar estos componentes. Los resultados de la aplicación del Mantenimiento Preventivo en los PADs influirán en mejorar la disponibilidad y confiabilidad del molino.

1.5 Objetivo

1.5.1 Objetivo General

Proponer un nuevo Plan de Mantenimiento Preventivo para mejorar la Disponibilidad de un Molino de Mineral en una Planta Concentradora de Gran Minería.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Revisar el Programa de Mantenimiento Preventivo del molino.
- Identificar los puntos críticos en el sistema de Lubricación de PADs.
- Analizar los parámetros de operación normal del sistema de lubricación de PADs del molino.
- Detallar trabajos específicos en caso se detecte parámetros fuera de rango de operación normal en los PADs del molino, realizando la calibración de PADs periódicamente.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

La aplicación de un nuevo Plan de Mantenimiento Preventivo en los Pads de los Molinos de Plantas Concentradoras en Gran Minería contribuirá en la mejora de la Disponibilidad Mecánica de los Molinos.

1.6.2 Hipótesis Específica

- La aplicación del análisis de criticidad permitirá intervenir en el mantenimiento de los PADs en base a su criticidad.
- El desarrollo de un Plan detallado de Mantenimiento Preventivo permitirá reducir las fallas en los PADs de los molinos.
- La aplicación de un nuevo Plan de Mantenimiento Preventivo reducirá las fallas en los PADs de los molinos.
- La implementación periódica de la calibración de PADs permitirá mejorar la disponibilidad del molino.

1.7 Variables, Operacionalización de Variables

1.7.1 Variables

Variable Independiente:

El análisis del Mantenimiento Preventivo en los Pads de los Molinos en la Planta Concentradora.

Variable Dependiente:

Disponibilidad mecánica del Molino de Bolas en una Planta Concentradora de Gran Minería.

La tabla 2 muestra a la variable independiente y sus respectivos indicadores.

Tabla 2*Indicadores de la variable independiente*

Variable Independiente	Indicadores
Análisis del Mantenimiento Preventivo en los PADs de Molinos en Planta Concentradora	Porcentaje de mejora de la Disponibilidad Mecánica del Molino
	Aumento en la vida útil de los PADs
	Aumento en la vida útil del aceite de lubricación
	Incremento de vida útil de componentes estructurales del molino

Fuente: Elaboración Propia

1.7.2 Dimensiones

- Análisis de criticidad.
- Análisis de modos de falla en PADs de molinos.
- Plan preventivo en PADs de molinos.
- Tiempo de parada.

1.7.3 Indicadores

- Grado de criticidad del Molino.
- Fallas funcionales.
- % Ejecución de las actividades planeadas.
- Disponibilidad (%) = (Horas totales - Horas parada) /Horas totales.

1.7.4 Operacionalización de Variables

Tabla 3

Operacionalización de variables

Variable Independiente	Definición Conceptual	Operacionalización		Escala
		Dimensiones	Indicadores	
Análisis del Mantenimiento Preventivo en los PADs de Molinos en Planta Concentradora	El Mantenimiento Preventivo es una estrategia en la que el trabajo de Mantenimiento se realiza con antelación para evitar fallos en los activos que pueden provocar tiempos de inactividad, problemas de seguridad y paradas de producción.	Análisis de Criticidad	Grado de Criticidad del Molino	A: Muy Crítico B: Medianamente Crítico C: Menos Crítico
		Análisis de Fallas	Fallas del equipo debido a PADs	Numero de Fallas
		Plan Preventivo en PADs de molinos	Cumplimiento de actividades preventivas	%
		Tiempo de parada	Disponibilidad del molino	%

Fuente: Elaboración Propia

1.8 Metodología de la Investigación

1.8.1 Unidad de Análisis

La investigación utilizará como unidad de análisis una falla catastrófica sucedida en los PADs de un molino de bolas FLSMIDTH de 26'x40' en la unidad Minera de Las Bambas.

1.8.2 Tipo, enfoque y Nivel de la Investigación

Tipo de Investigación

El presente trabajo de investigación es de naturaleza cuantitativo porque compara los resultados obtenidos en la calibración hidráulica de PADs y posterior restitución de los parámetros de temperatura y presiones en los PADs mejorando la disponibilidad programada para los molinos en una Planta Concentradora.

La Hipótesis será de tipo deductivo pues se realizarán análisis de los diferentes modos de falla a la que están expuestos los Pads de los molinos en esta falla catastrófica, Se mostrará el análisis ACR realizado en este caso.

Las mediciones y graficas son obtenidos de los sistemas PI SYSTEM que captura todas las variables de operación del molino incluyendo datos operativos de los PADs del molino de bolas.

Las características epistemológicas de la investigación son objetiva, deductiva, comprobación y se orienta al resultado.

El alcance del presente trabajo de investigación es explicativo ya que explica los diferentes modos de falla a la que están expuestas los PADs en los molinos y su relación con la Disponibilidad Mecánica programada.

Nivel de Investigación

Es descriptivo correlacional, descriptivo porque se da un análisis detallado del programa de mantenimiento de los Trunnion y del trabajo preventivo a realizarse, en este caso la Calibración de Pads. Es correlacional porque hay una relación entre variables.

1.8.3 Diseño de la Investigación

Esta investigación es de diseño no experimental debido a que no existe un cambio deliberado de variables, solo se procedió a realizar observaciones al programa existente para finalmente proponer mejoras.

1.8.4 Fuentes de la Información

La investigación se realizará fundamentalmente con datos primarios, provenientes de la información proporcionada en forma directa del sistema SAP, RMES, PI SYSTEM, AMPLA.

1.8.5 Población y Muestra

La población comprende 02 molinos de bolas FLSmidth de 26'x 40', y 02 molinos SAG de 40'x 26' de Minera Las Bambas. La muestra será en el molino que tuvo la falla catastrófica identificado como molino de bolas 310MLB001.

1.8.6 Técnicas e Instrumentos de recolección de Datos

Para comprobar la hipótesis formulada, en la presente investigación se solicitará el Programa de Mantenimiento Preventivo del Molino, Datos del sistema automático PI SYSTEM y AMPLA donde se hace el seguimiento de parámetros operativos del molino de bolas en Minera Las Bambas. También se tiene como evidencia visual los PADs que salieron de operación.

Los datos serán analizados para establecer los factores que contribuyeron a la falla catastrófica en los PADs del molino de bolas.

1.8.7 Análisis y Procesamiento de datos

Los datos recolectados serán procesados mediante gráficos y valores tabulados en los programas SAP, RMES, PI SYSTEM, AMPLA.

Los datos obtenidos serán analizados por un equipo conformado por personal propio de Minera Las Bambas y también de especialistas de FLSmidth quienes son los diseñadores del equipo a fin de verificar el alcance de la falla, los tiempos involucrados y las recomendaciones necesarias de tal manera de evitar la recurrencia de la falla y mejorar la disponibilidad del molino de bolas.

CAPITULO II. Marco Teórico y Conceptual

2.1 Bases Teóricas

2.1.1 La Actividad Minera

La Minería como actividad económica del hombre tiene un papel preponderante desde la antigüedad, a partir de su desarrollo mejoró la calidad de vida permitiendo su subsistencia.

La minería es una actividad extractiva que se desarrolla en todo el mundo y tiene su rol fundamental de crecimiento, sustento y desarrollo de los países.

Los minerales se presentan en la naturaleza en varias formas dependiendo de la ubicación geográfica es por ello que en determinadas zonas debido a la abundancia del mineral se conocen como por ejemplo a los países mineros como lo son Perú y Chile en donde hay muchos yacimientos ricos en cobre.

En el Perú los primeros productores de cobre y que tienen instalados estos molinos en sus plantas concentradoras se muestran en la tabla 4.

Tabla 4
Principales empresas productoras de cobre en el Perú

N°	Empresa	Región	Prod. (TMF)	% Part.
1	Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.	Arequipa	501,815	21%
2	Minera Las Bambas S.A.	Apurímac	452,950	19%
3	Compañía Minera Antamina S.A.	Áncash	439,248	18%
4	Southern Perú Copper Corporation	Moquegua y Tacna	306,153	13%
5	Compañía Minera Antapaccay S.A.	Cusco	206,493	8%

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2018)

Ismodes F (2014) *“Diagnostico del proceso operativo minero y minería ilegal”* indica que la Minería en Perú puede ser clasificada en Gran, Mediana, Pequeña y Artesanal, la regulación es la misma para la Gran y Mediana Minería, distinguiéndose entre ellos solo por su volumen de producción diaria. La Gran Minería tiene una capacidad de

procesamiento o beneficio sobre las 5000Ton/día y la Mediana Minería hasta las 5000Ton/día.

En la tabla 05 se indica la clasificación de las actividades mineras en el Perú de acuerdo con su estrato:

Tabla 5

Clasificación de la actividad minera de acuerdo con su estrato

ESTRATO	EXTENSIÓN ¹	CAPACIDAD PRODUCTIVA
GRAN MINERÍA	No aplica ²	Más de 5000 TMD
MEDIANA MINERÍA	No aplica ²	Hasta 5000 TMD
PEQUEÑA MINERÍA	Hasta 2000 ha	Hasta 350 TMD ³
MINERÍA ARTESANAL	Hasta 1000 ha	Hasta 25 TMD ⁴

1/ Suma de las áreas correspondientes a denuncios, petitorios y concesiones mineras.

2/ Solo se distingue en función al tamaño de producción mínima.

3/ Concesiones no metálicas hasta 3000m³/d

4/ Concesiones no metálicas hasta 200m³/d

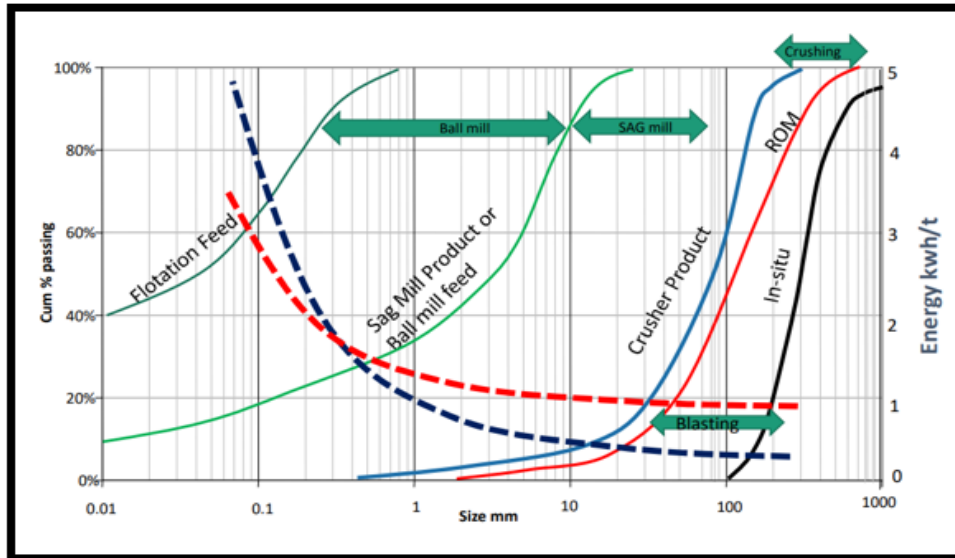
Fuente: GPAE Osinergmin (2017) “La Industria de la Minería en el Perú, 20 años de contribución al crecimiento y desarrollo económico del país.”

2.1.2 Proceso de conminución del mineral

De acuerdo con los análisis de los Drs. Powell M y Kanchiblotla S (2020) “*Advanced Mine to Mill Optimisation*” los procesos iniciales de voladura y chancado no consumen mayor cantidad de energía siendo a partir del tratamiento del mineral en la Planta Concentradora donde el consumo de energía se incrementa para lograr obtener el concentrado de mineral, ver figura 6.

Figura 6

Energía promedio necesarias para operaciones de molienda / concentración



Fuente: Powell M, Kanchibotla S: Advanced Mine to Mill Optimisation (2020)

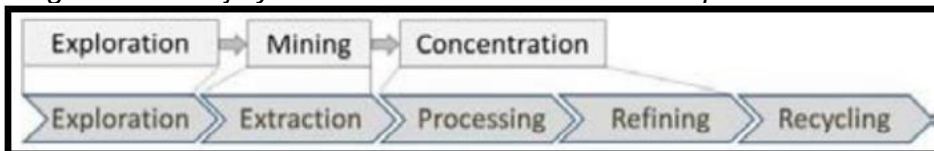
Los mayores consumos de energía dentro de una planta concentradora están localizados en el área de chancado y molienda y los equipos relacionados a este consumo son las chancadoras y molinos.

Jeswiet J y Szekeres A. (2016) *“Energy Consumption in Mining Comminution”* analizan el consumo de energía en los procesos de conminución de mineral e indican que la minería es el primer eslabón en el proceso de obtención del metal además del reciclaje.

La Figura 7 muestra el diagrama del proceso de obtención del metal, en esta cadena de suministro la concentración de mineral es el proceso de conminución donde el mineral se separa de roca que contiene minerales, ya sea química o físicamente.

Figura 7

Diagramas de flujo y cadena de valor de las materias primas

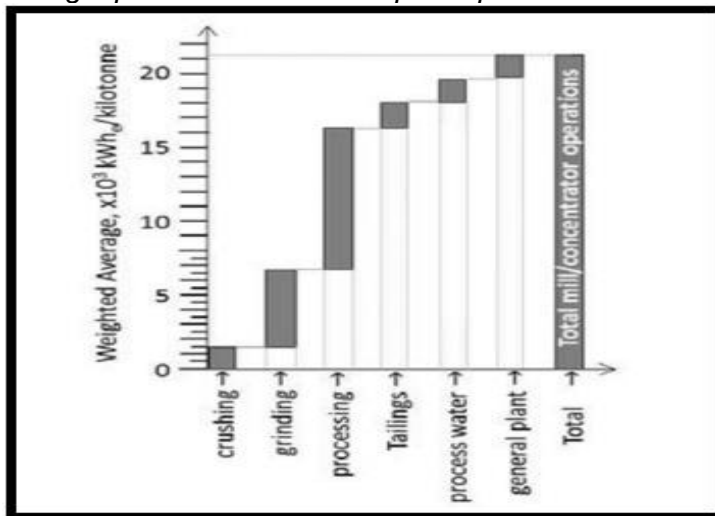


Fuente: Jeswiet J, Szekeres A: Energy Consumption in Mining Comminution (2016)

De acuerdo con esta investigación el consumo de energía promedio durante el proceso de extracción de concentrado en una mina se muestra en la figura 8.

Figura 8

Energía promedio necesarias para operaciones de molienda / concentración



Fuente: Jeswiet J, Szekeres A: Energy Consumption in Mining Comminution (2016)

El mineral localizado en el yacimiento minero pasa por una serie de procesos para lograr extraer la parte valiosa y obtener el retorno económico objetivo.

2.1.3 Planta concentradora de gran minería

El mineral extraído de los yacimientos mineros dependiendo de su naturaleza son tratados de diversas maneras siendo una de ellas en las Plantas Concentradoras que es una instalación en donde se alojan muchas maquinarias para procesar el mineral extrayéndose finalmente el concentrado que es la parte comercializable del mineral.

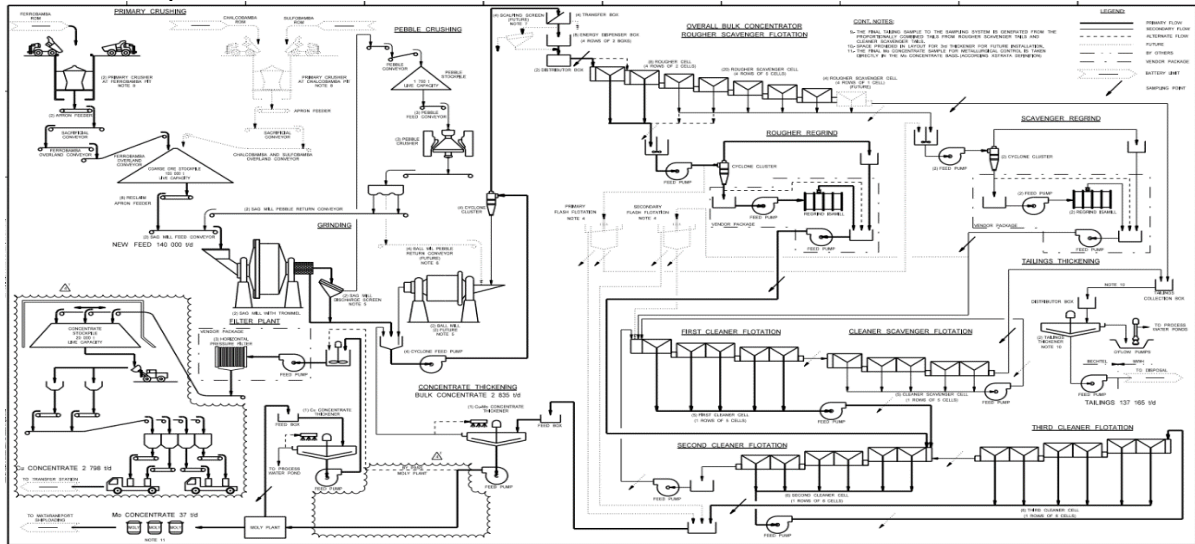
Dentro de la concentradora se encuentran instalados las Chancadoras, Molinos, Fajas Transportadoras, Celdas de Flotación, Bombas, etc.

Al año 2025 las Plantas Concentradoras de Minerales modernas de Gran Minería tienen operando en sus instalaciones molinos de gran tamaño (20000KW) para el procesamiento del mineral, estos equipos mayores e importantes en estas instalaciones son diseñados para tener una alta disponibilidad mecánica para lograr el objetivo de throughput diario solicitado en los planes de producción de concentrado en una mina.

La capacidad de procesamiento de mineral en estas plantas concentradoras sobrepasa las 100000Ton/día y están instaladas en diferentes yacimientos mineros en todo el mundo y en el Perú las de reciente instalación se encuentran en Apurímac y Moquegua.

En la figura 9 se muestra un Flowsheet típico de una planta concentradora de 140000ton/día.

Figura 9
Flow Shett típico de una Planta Concentradora



Fuente: Plano Minera Las Bambas (2012)

2.1.4 Definición de Mantenimiento

El mantenimiento se describe como el proceso sistemático de intervenir en los equipos e instalaciones de la empresa para asegurar que mantengan su capacidad operativa, minimizando los costos y garantizando la seguridad del personal y la continuidad del proceso productivo, de acuerdo a esta definición en el contexto de una planta concentradora, los activos de una empresa requieren mantener su capacidad operativa a fin de cumplir su objetivo procesar una cierta cantidad de mineral presupuestado dentro de un contexto de continuidad de la operación, seguridad para el personal e instalaciones y cuidado del medio ambiente.

Las desviaciones en el cumplimiento de un programa de mantenimiento derivan en fallos inesperados que detienen a un equipo específico y dependiendo de la criticidad del equipo la detención puede abarcar líneas completas de producción siendo el impacto en la disminución de la producción hasta que el equipo recupere su capacidad operativa.

La gestión del mantenimiento mediante actividades preventivas y predictivas de manera anticipada implica mantener disponibilidades exigidas por el presupuesto anual.

Los trabajos correctivos deben ser evitados en el caso de equipos críticos, de suceder el impacto en la disponibilidad del equipo es significativo.

2.1.4.1 Definición de estrategias de Mantenimiento

Una estrategia de mantenimiento consiste en determinadas prácticas mantención que se pueden aplicar a los equipos o maquinarias con el objetivo de lograr su continuidad operativa minimizando la ocurrencia de fallas y extendiendo la vida útil del equipo o maquinaria.

Dentro de las estrategias que se puede identificar tenemos los siguientes más practicados:

Mantenimiento Correctivo:

Consiste en realizar intervenciones al equipo o maquinaria cuando este haya registrado la falla, ocasiona detenciones y costos no programados, los tiempos que toman para lograr reponer la operatividad del equipo por lo general es mucho mayor a cuando se realicen trabajos programados. Esta estrategia aun es aplicada en equipo no críticos de la planta concentradora.

Mantenimiento Preventivo:

Los trabajos de mantenimiento son programados, el objetivo es prevenir los fallos en los equipos, la confiabilidad se incrementa sin embargo ocasionalmente los costos pueden elevarse por realizar intervenciones no requeridas.

Mantenimiento Predictivo:

Los trabajos de mantenimiento tienen el soporte de equipos de monitoreo que inspeccionan las variables operativas de un equipo indicando el momento apropiado para realizar la intervención, se debe realizar una inversión previa en equipos de monitoreo según las variables que se requieran controlar, asimismo especializar al personal en el manejo e interpretación de datos de los equipos de monitoreo.

Mantenimiento Proactivo:

Las actividades están centradas en analizar la causa raíz de las fallas, el objetivo es evitar la recurrencia de estas fallas, es necesario un análisis del proceso operativo y de mantenimiento.

Confiabilidad y Disponibilidad

La confiabilidad de un equipo esta referido a la probabilidad de que desarrolle su función dentro del circuito de producción durante un determinado periodo de tiempo sin presentar ningún fallo. Cuando un equipo presenta alta confiabilidad de puede esperar que la productividad y disponibilidad aumentan disminuyendo el número de intervenciones por mantenimiento a realizar. Se tiene KPIs para controlar la capacidad operativa de los equipos:

Tasa de fallos (Failure Rate, λ):

- La tasa de fallos se refiere a la frecuencia con la que un equipo experimenta fallos, y generalmente se expresa como el número de fallos por unidad de tiempo (por ejemplo, fallos por hora o por día). Una tasa de fallos baja indica alta confiabilidad.

$$\lambda = N / T$$

donde:

N: número de fallos

T: tiempo total de operación

Función de confiabilidad (R(t)):

- Es una función matemática que describe la probabilidad de que un equipo no falle hasta el tiempo tt . Se utiliza en modelos estadísticos como la distribución de Weibull, que se adapta a muchos tipos de fallos industriales.

$$R(t) = e^{-\lambda t R(t)} = e^{-\lambda t}$$

donde:

- $R(t)R(t)$ es la probabilidad de que el equipo no falle hasta el tiempo tt ,
- λ es la tasa de fallos,
- tt es el tiempo de operación.

MTBF (Mean Time Between Failures):

- El tiempo medio entre fallos es una medida que se utiliza para evaluar la confiabilidad de un equipo. Se calcula como el tiempo promedio entre dos fallos sucesivos de un equipo. Un MTBF más alto significa mayor confiabilidad.

$$\text{MTBF} = \text{Tiempo Total de Operación} / \text{Numero de fallos}$$

MTTR (Mean Time To Repair):

- El tiempo medio de reparación es el tiempo promedio que se tarda en reparar un equipo después de que ocurre un fallo. Un MTTR bajo indica una reparación rápida y una mayor disponibilidad del equipo.

$$\text{MTTR} = \text{Tiempo Total de Reparación} / \text{Numero de fallos}$$

Disponibilidad (A):

- La disponibilidad de un equipo es la proporción del tiempo en que está listo para operar sin fallos. Se puede calcular a partir del MTBF y MTTR utilizando lo siguiente:

$$A = (\text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})) * 100$$

La disponibilidad, por otro lado, mide la proporción de tiempo que un equipo está en un estado funcional y listo para ser usado cuando se requiere. Es una medida directa de la eficiencia operativa y está íntimamente relacionada con las prácticas de mantenimiento. En una planta concentradora donde los molinos son fundamentales para el procesamiento de minerales, la disponibilidad de estos equipos es crucial para evitar disminución o detención en la capacidad de molienda de la Planta Concentradora y garantizar una operación continua.

Ambas, la confiabilidad y la disponibilidad son componentes clave del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), cuyo objetivo es desarrollar un plan de mantenimiento que garantice el máximo nivel de eficiencia operativa con el mínimo de intervenciones de mantenimiento.

Sistema SAP:

Es un software que permite programar equipos, actividades, recursos, frecuencias de intervención, costos a fin de sistematizar todas las actividades de mantenimiento y generar estadísticas, presupuestos e historial de intervenciones que ayuden a tomar decisiones acerca de las estrategias y actividades de mantenimiento.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Molino de Planta concentradora de Gran Minería

Equipo rotativo que tiene como objetivo reducir de tamaño a la roca con el objetivo de liberar al mineral que se encuentran en ella. Los Molinos de Gran Minería para este análisis tienen las siguientes medidas: molinos SAG de 38'x19' y de 40'x25', molinos de bolas de 20'x36' y de 26'x40'. Algunos de estos equipos están ubicados en las plantas Concentradora de Minera Antamina y de Minera Las Bambas.

2.2.2 Principio de operación de un Molino

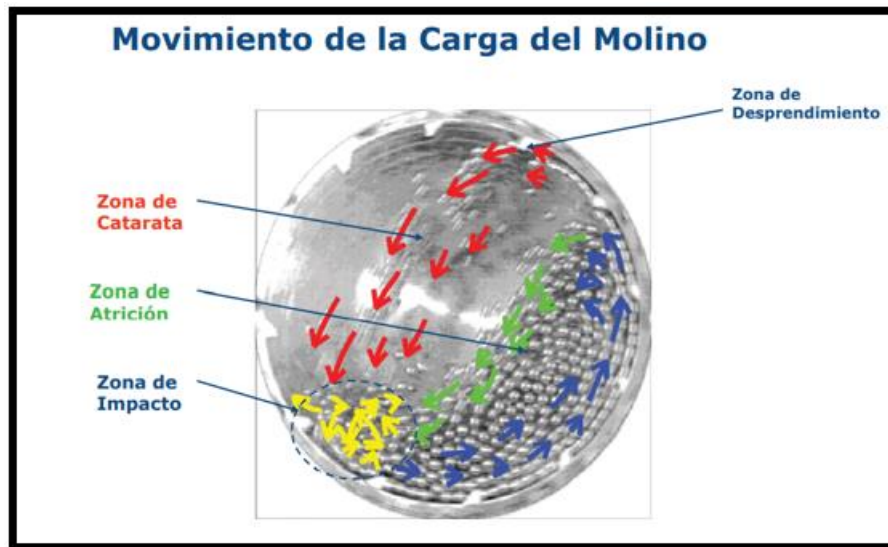
El giro del molino es generado por el accionamiento de un motor de velocidad variable que lo hace girar hasta un 85% de la Velocidad Crítica del molino. Por lo general un molino opera en un rango de 65 a 70% de la velocidad crítica.

La Velocidad Crítica es la velocidad a la cual la componente tangencial de la velocidad provoca que los medios de molienda (bolas de acero) se peguen a las paredes del molino y disminuya la acción de molienda disminuyendo también la potencia del motor.

El giro del molino provoca la disminución del tamaño del mineral por fractura entre ellas mismas, por los golpes con los medios de molienda y por abrasión entre los medios de molienda. La figura 10 muestra el movimiento interno de las bolas en el Molino de una Planta Concentradora.

Figura 10

Movimiento de la carga dentro del molino.



Fuente: Capacitación de Mantenimiento Mecánico y Eléctrico de Molinos SAG y Bolas FLSMidth (2015)

2.2.3 Partes Principales de un Molino

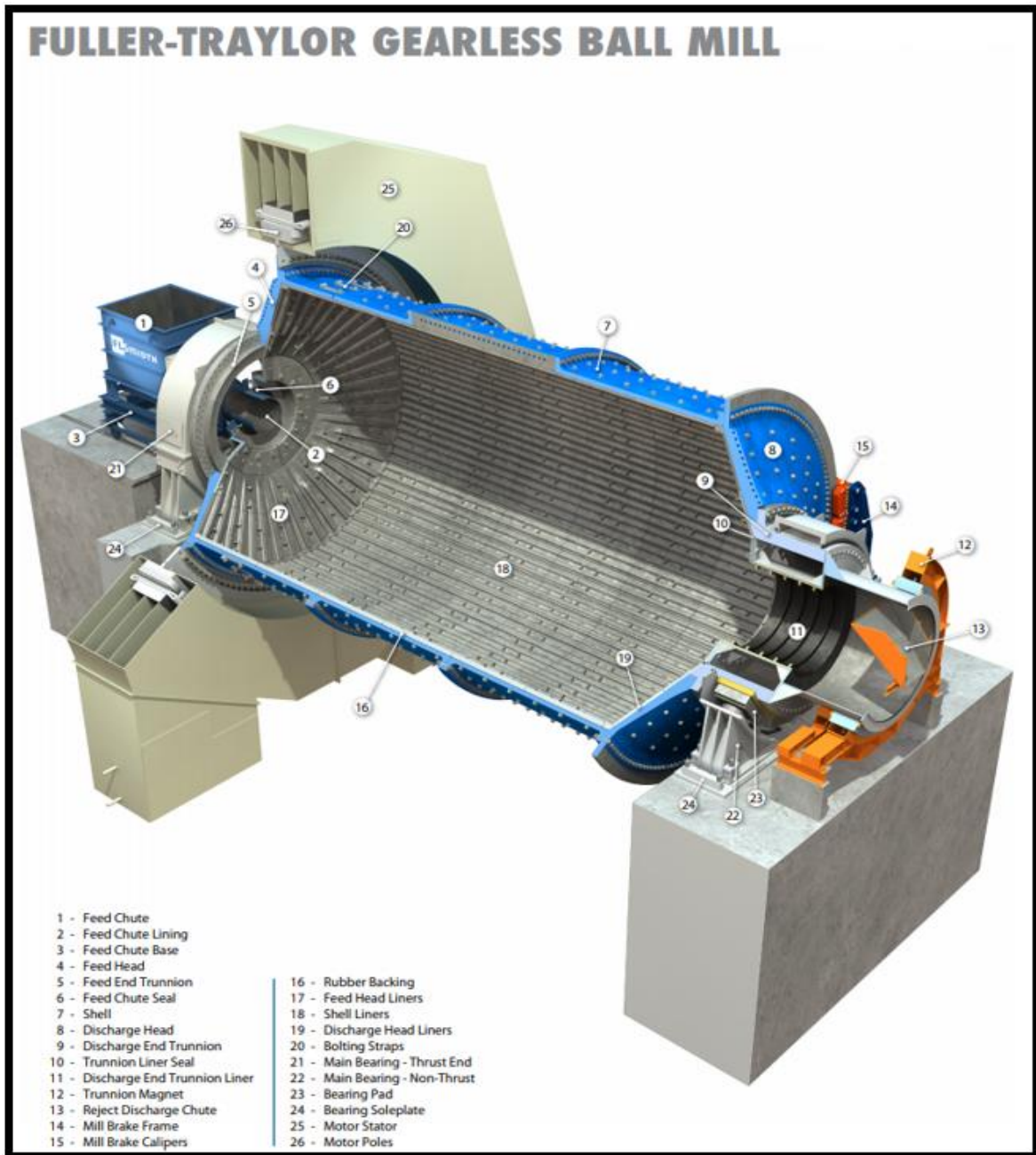
Estos molinos tienen partes muy importantes entre las que destacan el motor eléctrico gearless (sin engranajes) controlado desde una sala eléctrica, el molino propiamente dicho que incluye el cuerpo metálico de forma cilíndrica y sus tapas de alimentación y descarga, los revestimientos, los chutes de transferencia, el sistema hidráulico de frenado del molino y el Sistema de Lubricación.

Una parte vital para la operación del molino es el Sistema de Lubricación y el Cojinete como soporte del molino que es la parte que motiva el análisis en este trabajo.

En la figura 11 se muestra las partes principales de un molino secundario de Bolas.

Figura 11

Partes principales de un molino de bolas FLSMidth de 26'x40'.



Fuente: Capacitación de Mantenimiento Mecánico y Eléctrico de Molinos SAG y Bolas FLSMidth (2015)

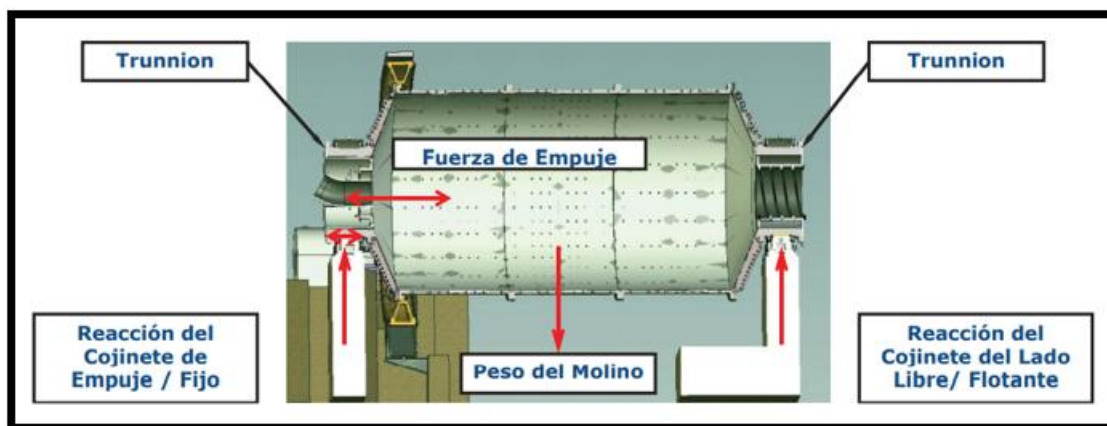
2.2.4 Cojinetes de un Molino

Se muestra el diagrama de cuerpo libre de un molino, donde se observa que se tiene dos apoyos que transmiten todo el peso del molino a sus respectivos cojinetes, ubicados en la alimentación y descarga del molino.

En la figura 12 se muestra los apoyos del Molino que son los Trunnion de alimentación y descarga del molino y estos descansan sobre los cojinetes.

Figura 12

Cojinetes del Molino de bolas FLSMidth de 26'x40'.



Fuente: Capacitación de Mantenimiento Mecánico y Eléctrico de Molinos SAG y Bolas FLSMidth (2015)

Estos cojinetes tienen componentes a través del cual se inyecta aceite hidráulico a presión con el objetivo de formar una película de aceite sobre el cual el molino “flota” para permitir su giro libre en ambos sentidos.

Como parte de los cojinetes se tienen por lo general cuatro elementos de sacrificio fabricados en bronce llamados PADs que es por donde ingresa el aceite hidráulico a presión para formar la película de aceite entre el trunnion del molino y el PAD.

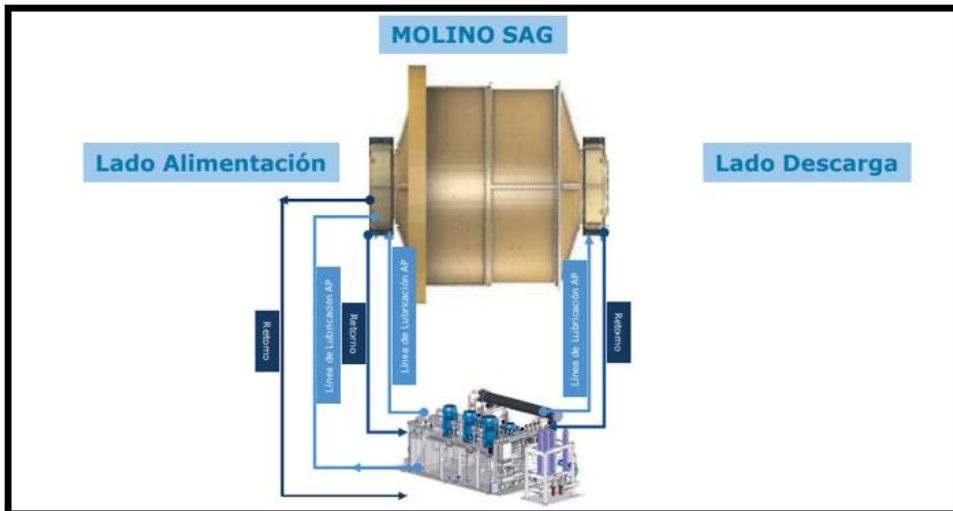
2.2.5 Sistema de Lubricación hidrostática de un molino

Es un conjunto de componentes como son Bombas hidráulicas, motores eléctricos, filtros, divisores de flujo, acumuladores, Instrumentos de control de presión y flujo, líneas de alimentación y retorno de aceite. Todos estos componentes se encargan de enviar el aceite limpio y a presión a los PADs.

Las figuras 13 y 14 muestran el sistema de lubricación de un Molino de SAG y los puntos en donde inyectan el aceite de alta presión a los cojinetes.

Figura 13

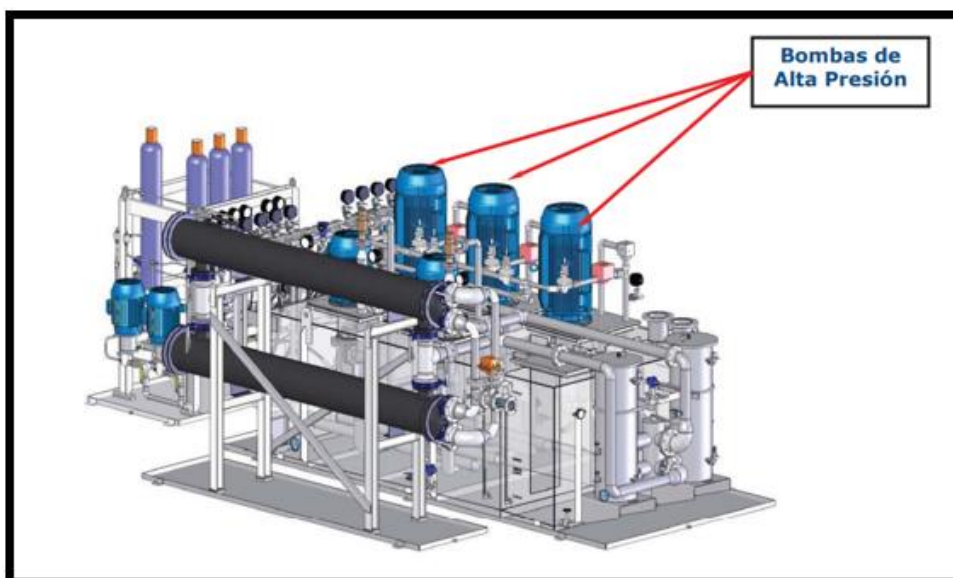
Circuito de aceite de alta presión de un Molino.



Fuente: Capacitación de Mantenimiento Mecánico y Eléctrico de Molinos SAG y Bolas FLSMidth (2015)

Figura 14

Sistema de alta presión de un molino de bolas.



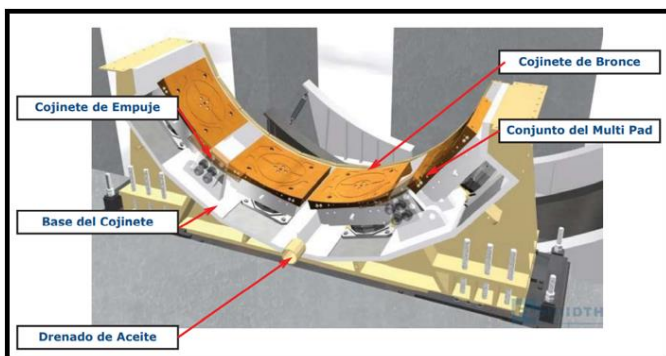
Fuente: Capacitación de Mantenimiento Mecánico y Eléctrico de Molinos SAG y Bolas FLSMidth (2015)

2.2.6 PADs en los Cojinetes de un molino

Los PADs de los cojinetes son componentes de bronce por donde se inyecta el aceite hidráulico a alta presión con el objetivo de lograr la formación de una película de aceite entre el PAD y el trunnion del Molino con esto el molino puede girar libremente en ambos sentidos. En la figura 15 se muestra los PADs de bronce de uno de los cojinetes del Molino.

Figura 15

Distribución de PADs dentro del cojinete de soporte del molino.

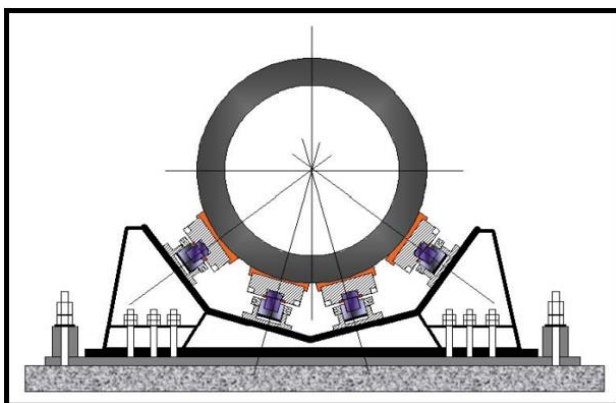


Fuente: Capacitación de Mantenimiento Mecánico y Eléctrico de Molinos SAG y Bolas FLSMidth (2015)

La figura 16 muestra una vista de frente de uno de los trunnion del molino que descansa sobre el cojinete formado por cuatro PADs de bronce.

Figura 16

Trunnion de molino sobre los PADs del cojinete.



Fuente: Capacitación de Mantenimiento Mecánico y Eléctrico de Molinos SAG y Bolas FLSMidth (2015)

CAPITULO III: Desarrollo del trabajo de Investigación

3.1 Falla catastrófica de PAD en Molino de Bolas 310MLB001 de Minera Las Bambas

3.1.1 Descripción y Datos de diseño del molino de bolas FLSmidth de 26' x 40' 310MLB001:

El molino de bolas de Minera Las Bambas tiene las siguientes medidas: 26' (7.93m) de diámetro x 40' (12.34m) de longitud. Se trata de un molino de bolas por desbordamiento con un diámetro interior de 7.92m y una longitud de trituración de 12.19m. El molino esta accionado por un motor Gearless (motor periférico) de 16400kW. Los datos técnicos se indican en la tabla 6 y 7.

Tabla 6

Datos principales del molino de bolas 310MLB001.

Especificación	Datos
Tamaño del molino	7,93 m (26 pies) de diámetro por 12,34 m (40,5 pies) de longitud
Tipo de molino	Trituración húmeda, descarga por desbordamiento
Tamaño del motor de accionamiento del molino	16.400 kW
Tipo de motor de accionamiento del molino	Periférico

Fuente: Manual del molino de bolas FLSmidth.

Tabla 7*Datos del circuito de lubricación del molino de bolas 310MLB001.*

Especificación	Datos
Capacidad del depósito hidráulico	Depósito de 15.140 litros (tres compartimentos) 9.650 litros de volumen de carga de aceite (compartimentos de retorno, sedimentación y acondicionamiento)
Tipo/Clasificación de la bomba lubricante de baja presión	Bomba de tornillo, 1.059 lpm, una en servicio, una de reserva
Motor de la bomba de lubricación de baja presión	37 kW/1.800 rpm/460 V/3 fases/60 Hz
Tipo/Clasificación de la bomba lubricante de alta presión	Bomba de tornillo, 409 lpm por bomba, dos en servicio, una de reserva
Motor de la bomba de lubricación de alta presión	150 kW/1.800 rpm/460 V/3 fases/50 Hz
Caudal por almohadilla del cojinete	90,8 lpm
Caudal por riel de empuje	45,4 lpm
Tipo de aceite hidráulico	ISO 220 (240 cSt a 37°C)
Requisito de agua de enfriamiento	1.544 lpm a 30°C
Caudal de descarga de la bomba de reducción	26,5 lpm
Tipo/Clasificación de la bomba de reducción	Bomba de engranajes, 20.700 kPa nominal, una en servicio, una de reserva
Motor de la bomba de reducción	15 kW/1.800 rpm/460 V/3 fases/60 Hz
Tamaño y cantidad de acumuladores	Cuatro acumuladores, 57 litros cada uno, tipo ampolla
Caudal durante la reducción	18,1 lpm a cada una de las ocho cavidades de las almohadillas de los cojinetes; total de 145 lpm
Duración nominal del tiempo de reducción	30 segundos
Volumen total utilizable en los acumuladores	228 litros
Tiempo de carga del acumulador, después del vaciado	12 minutos
Fabricante del sistema de lubricación	Howard Marten Company Ltd.

Fuente: Manual del molino de bolas FLSmidth.

3.1.2 Parámetros operativos del sistema de lubricación del molino de bolas FLSmith de 26' x 40' 310MLB001

Los parámetros operativos del molino de bolas 310MLB001 se indican en la tabla 8.

Tabla 8

Parámetros operativos del molino de bolas 310MLB001.

Límites operativos de componentes o subsistemas

Componente o sistema	Límites operativos	
	Máximo	Mínimo
Sistema de lubricación de los cojinetes		
Depósito del molino, nivel de aceite en el compartimiento acondicionado	Parte superior de la mirilla	Parte inferior de la mirilla
Depósito del molino, temperatura del aceite en el compartimiento acondicionado	39°C	28°C
Depósito del molino, nivel de aceite en el compartimiento de retorno	Parte superior de la mirilla	Parte inferior de la mirilla
Depósito del molino, temperatura del aceite en el compartimiento de retorno	41°C	26°C
Depósito del molino, nivel de aceite en el compartimiento de sedimentación	Parte superior de la mirilla	Parte inferior de la mirilla
Temperatura del aceite de retorno del cojinete del extremo de carga del molino	50°C	27°C
Temperatura del aceite de retorno del cojinete del extremo de descarga del molino	50°C	27°C
Presión de descarga de la bomba de acondicionamiento de baja presión	1034 kPa	517 kPa
Temperatura de aceite de descarga del intercambiador térmico de baja presión	37°C	28°C
Temperatura de suministro del agua de enfriamiento al intercambiador térmico del sistema de baja presión	30°C	N/A
Caudal de retorno del agua de enfriamiento al intercambiador térmico del sistema de baja presión	N/A	1059 lpm
Presión diferencial del filtro de aceite de baja presión	172 kPa dif.	N/A
Presión de aceite de entrada del divisor de flujo del riel de empuje izquierdo del extremo de carga	8.900 kPa	N/A
Presión de aceite de entrada del divisor de flujo del riel de empuje derecho del extremo de carga	8.900 kPa	N/A
Almohadilla de levantamiento del cojinete de presión de aceite	8.900 kPa	4.000 kPa
Flujo de aceite del divisor de flujo del cojinete del extremo de carga	409 lpm	327 lpm
Flujo de aceite del divisor de flujo del cojinete del extremo de descarga	409 lpm	327 lpm
Flujo de aceite del riel de empuje izquierdo del extremo de carga	45 lpm	36 lpm
Continúa...		
Flujo de aceite del riel de empuje derecho del extremo de carga	45 lpm	36 lpm
Presión de aceite de alta presión de reducción que ingresa al divisor de flujo	20.600 kPa	17.900 kPa
Presión de descarga de la bomba de carga del acumulador	20.600 kPa	17.900 kPa
Presión diferencial del filtro de descarga de la bomba de carga del acumulador	518 kPa dif.	N/A
Presión de entrada del acumulador	20.700 kPa	17.940 kPa
Presión de nitrógeno del acumulador	8.687 kPa	8.280 kPa
Presión de entrada de la válvula de descarga	20.600 kPa	17.940 kPa

Fuente: Manual del molino de bolas FLSmith.

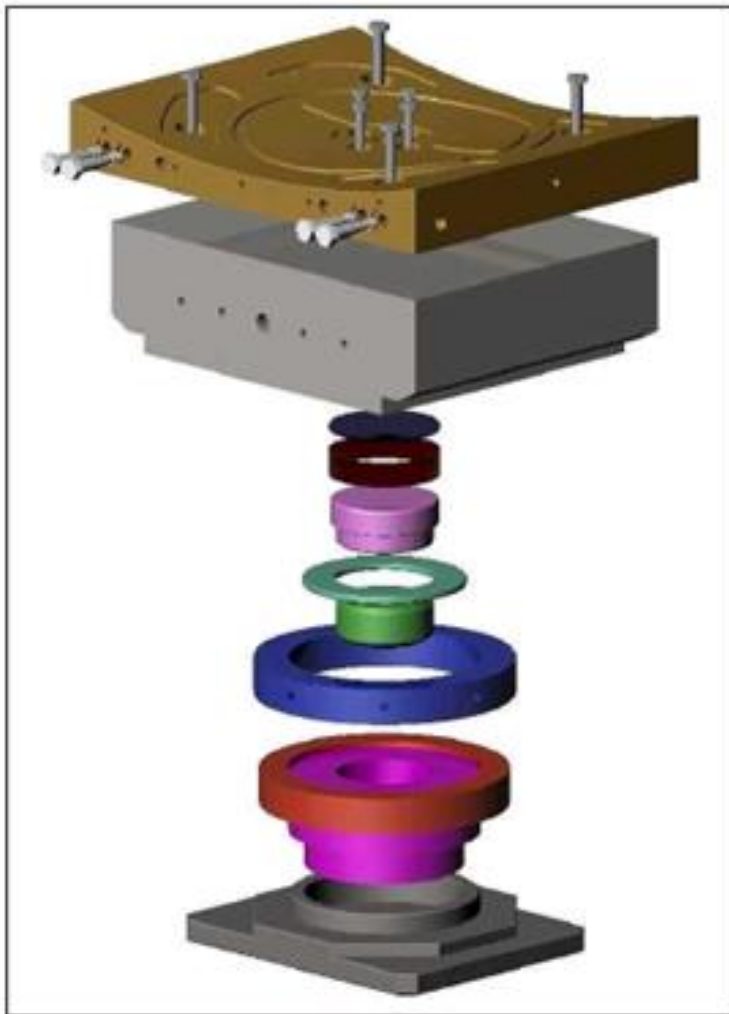
3.1.3 Descripción de la función de los PADs del molino de bolas FLSmith de 26' x 40' 310MLB001:

Dos conjuntos de cojinetes principales, uno fijo y otro libre, sirven de apoyo al molino de bolas 310MLB001. Cada conjunto de cojinetes consta de cuatro PADs de levantamiento ajustables, lubricados hidrostáticamente, que sirven de apoyo al molino mediante sus trunnion. Además, el cojinete fijo tiene dos conjuntos de empuje llamados TRHUST PADs lubricados hidrostáticamente que localizan el molino axialmente y resisten las fuerzas de

empuje. La posibilidad de giro del molino es bidireccional. En ambos trunnion están instalados detectores de temperatura de resistencia (RTDs) para monitorear la temperatura de los trunnion. En la figura 17 se muestra el diagrama de partes de un PAD.

Figura 17

Diagrama de partes de un PAD de molino.



Fuente: Manual de Mantenimiento y Operación de molino de bolas Minera Las Bambas FLSMidth (2015)

3.1.4 Datos operativos de los PADs que deben ser anotados durante la operación del molino de bolas FLSmidth de 26' x 40' 310MLB001

Las tablas que proporciona FLSmidth para anotar los parámetros operativos de los PADs se muestran en la tabla 9.

Tabla 9

Tabla para anotar parámetros operativos de presión del molino de bolas 310MLB001.

GRINDING MILL BEARING PRESSURES Figure 4

EQUIPMENT IDENTIFICATION _____

PRESSURE MEASUREMENTS

FIXED END			FREE END			THRUST		
PAD	LOCATION	PRESSURE	PAD	LOCATION	PRESSURE	PAD	LOCATION	PRESSURE
A1	1		A5	1		B1	6	
A1	2		A5	2		B1	8	
A1	3		A5	3		B2	6	
A1	4		A5	4		B2	8	
A1	5		A5	5		B3	6	
A2	1		A6	1		B3	8	
A2	2		A6	2		B4	6	
A2	3		A6	3		B4	8	
A2	4		A6	4				
A2	5		A6	5				
A3	1		A7	1				
A3	2		A7	2				
A3	3		A7	3				
A3	4		A7	4				
A3	5		A7	5				
A4	1		A8	1				
A4	2		A8	2				
A4	3		A8	3				
A4	4		A8	4				
A4	5		A8	5				

DESCRIPTION

PRESSURE UNITS _____

DATE _____

TIME _____

NAME _____

INITIAL HERE X _____

Fuente: Manual del molino de bolas FLSmidth.

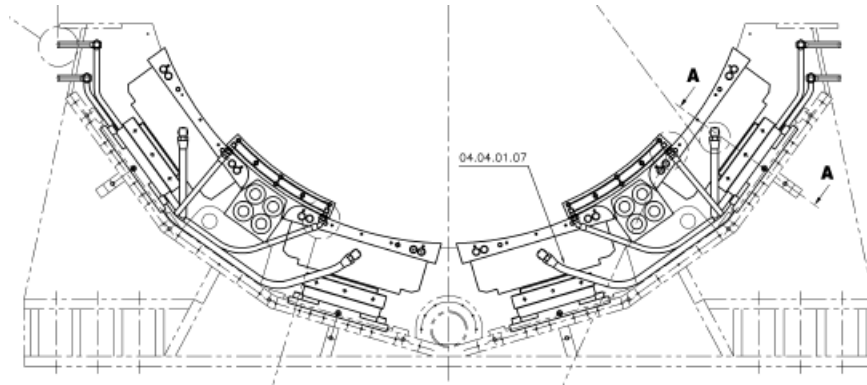
3.1.5 Distribución de los PADS en los trunnion de alimentación y descarga del molino de bolas FLSmidth de 26' x 40' 310MLB001

En las figuras 18 y 19 se muestran la disposición de PADS en los trunnion de alimentación y descarga respectivamente.

Figura 18

Disposición de PADs del trunnion de alimentación de un molino.

PADs del lado trunnion alimentación

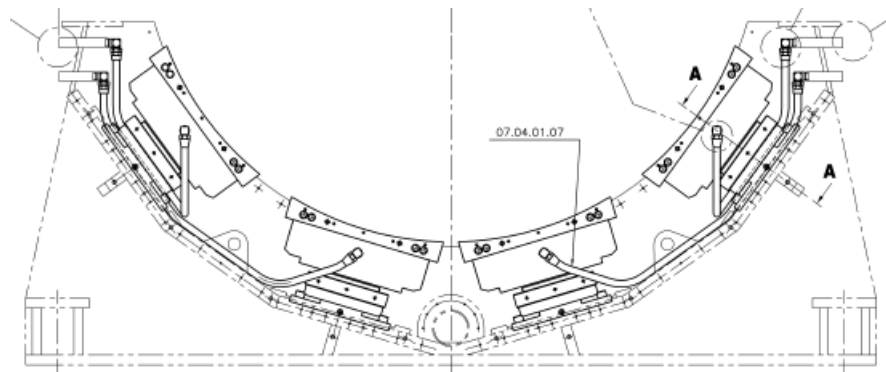


Fuente: Manual de Mantenimiento y Operación de molino de bolas Minera Las Bambas
FLSMidth (2015)

Figura 19

Disposición de PADs del trunnion de descarga de un molino.

PADs del trunnion lado descarga



Fuente: Manual de Mantenimiento y Operación de molino de bolas Minera Las Bambas
FLSMidth (2015)

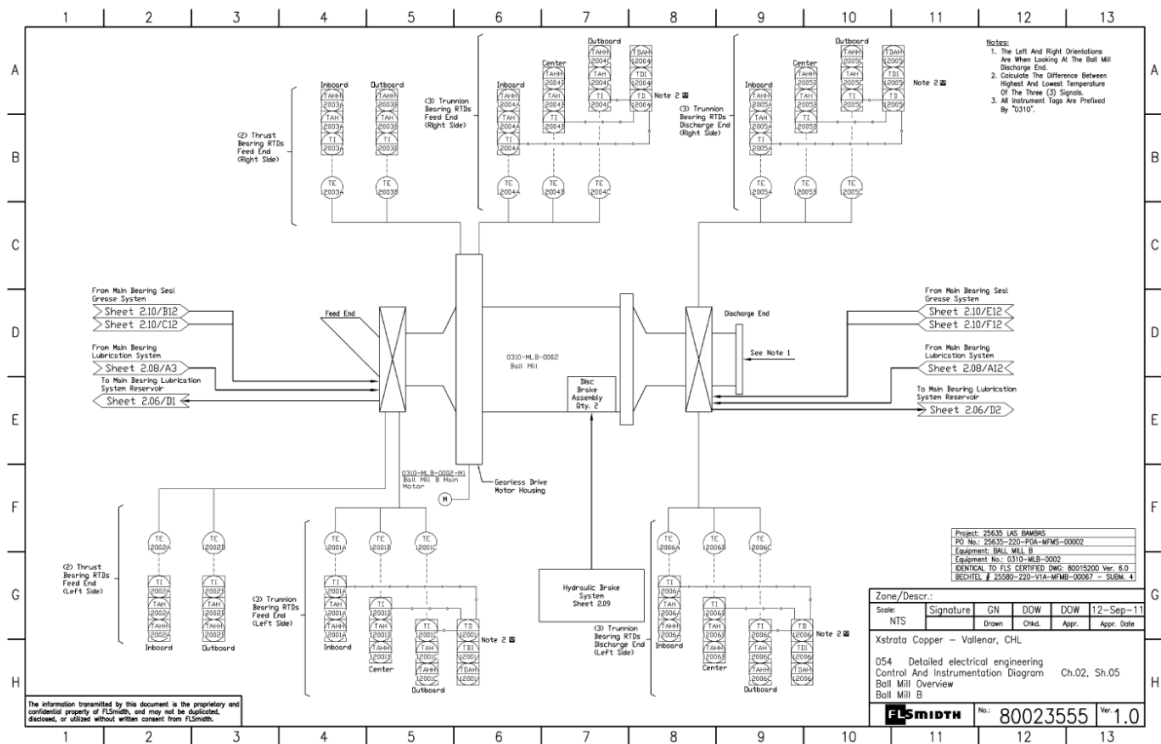
3.1.6 Instrumentación del molino incluyendo los trunnion y PADs del molino de bolas

FLSMidth de 26' x 40' 310MLB001

En las figuras 20 y 21 se muestra la instrumentación del molino y de sistema de PADs.

Figura 20

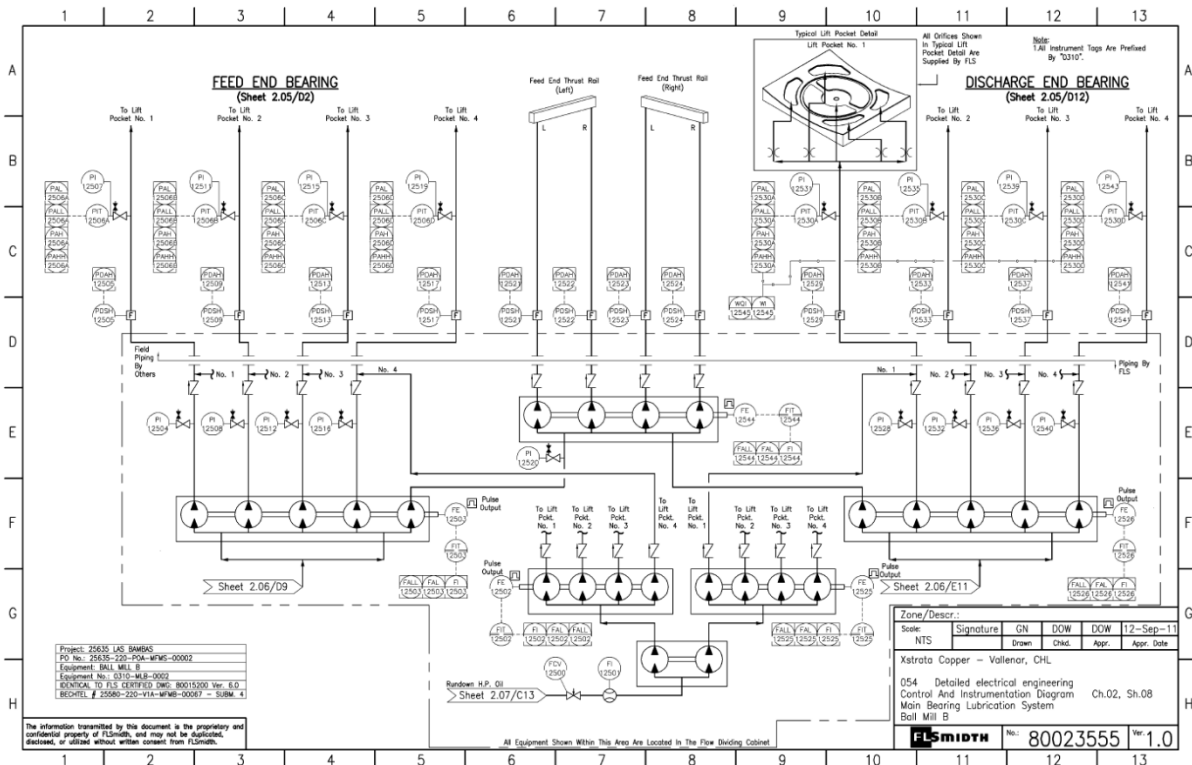
Instrumentación del trunnion de un molino de bolas.



Fuente: Manual de Mantenimiento y Operación de molino de bolas Minera Las Bambas FLSMidth (2015)

Figura 21

Instrumentación de los PADs de un molino de bolas.



Fuente: Manual de Mantenimiento y Operación de molino de bolas Minera Las Bambas FLSMidth (2015)

3.1.7 Falla catastrófica en PADs del lado de alimentación del molino de bolas 310MLB001

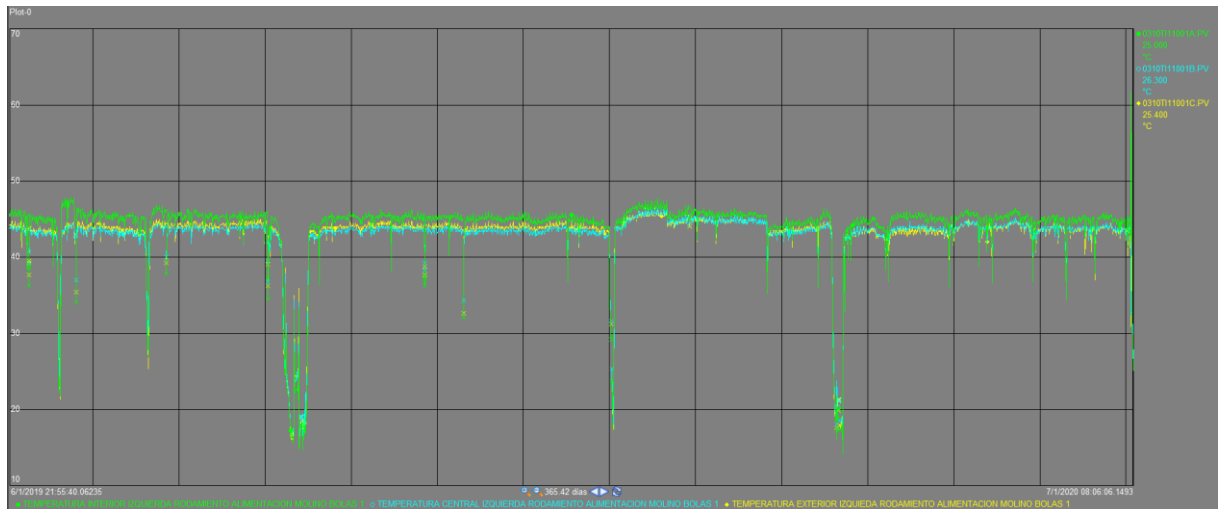
3.1.7.1 Variables operativas en la zona del trunnion del molino de bolas MLB001

Temperaturas:

La tendencia de temperatura del trunnion de alimentación del MLB001 en el año 2019 (datos de 01 año), en los tres sensores no tuvo incrementos superiores a 50 °C (Alarma) y 55°C (Trip). (Datos del PI SYSTEM), en la figura 22 se muestra la tendencia de temperaturas del año 2019.

Figura 22

Tendencia de temperatura de PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001.

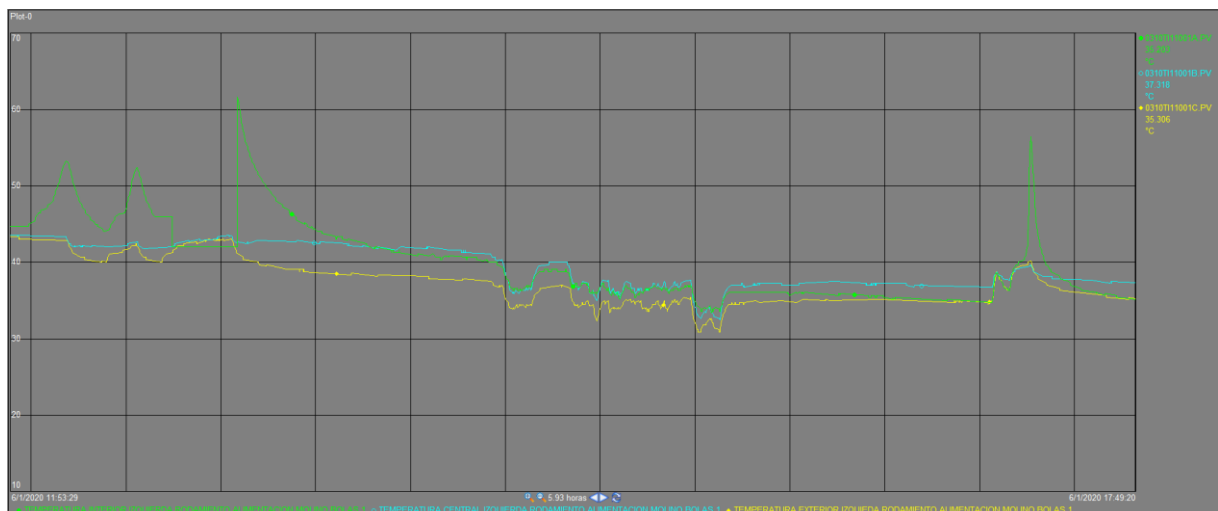


Fuente: Datos del PI SYSTEM para el año 2019.

El día de la falla catastrófica (06 de enero 2020), la detención del molino se produce alarma de diferencial temperatura en el trunnion de alimentación del molino MLB001 (datos del PI SYSTEM), en la figura 23 se muestra las tendencias de temperatura el día de la falla.

Figura 23

Tendencia de temperatura de PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001



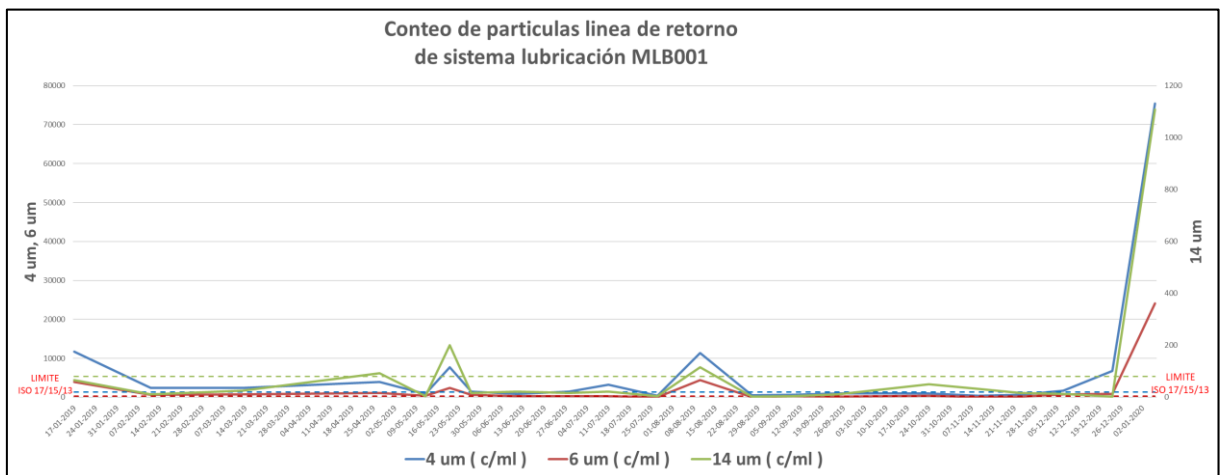
Fuente: Datos del PI SYSTEM para el año 2019

Limpieza del aceite:

En el análisis del aceite se puede visualizar que el conteo de partículas el día de la falla es elevado, fuera de los rangos normales, en la figura 24 se muestra esta tendencia.

Figura 24

Tendencia de conteo de partículas en el aceite en el año 2019 del molino 310MLB001.



Fuente: Datos del área de confiabilidad Minera Las Bambas para el año 2019.

El aceite de retorno del sistema de lubricación del MLB001 se ha incrementado en las partículas de 4, 6 y 14 μm en el periodo del 23-dic-2019 hasta el 06-ene-2020.

Este incremento es aún más evidente en la trampa magnética del circuito de lubricación y las limaduras encontradas en el compartimiento de los PADs tal como se aprecia en la figura 25.

Figura 25

Muestra de partículas en el sistema de lubricación el día del evento en el molino 310MLB001.



Fuente: Datos del área de confiabilidad Minera Las Bambas para el año 2020.

3.1.8 Análisis ACR de la falla súbita de PADs lado alimentación del molino de bolas MLB001

Impacto: Detención de una línea de molienda por 05 días 18 hrs y 2 min para realizar cambio de 4 Pad's del lado alimentación del molino MLB001, en la figura 26 se muestra la zona dañada del PAD 3.

Figura 26

Zona dañada en el PAD 3 del trunnion de alimentación en el molino 310MLB001



Fuente: Datos del área de confiabilidad Minera Las Bambas para el año 2020

Línea de tiempo:

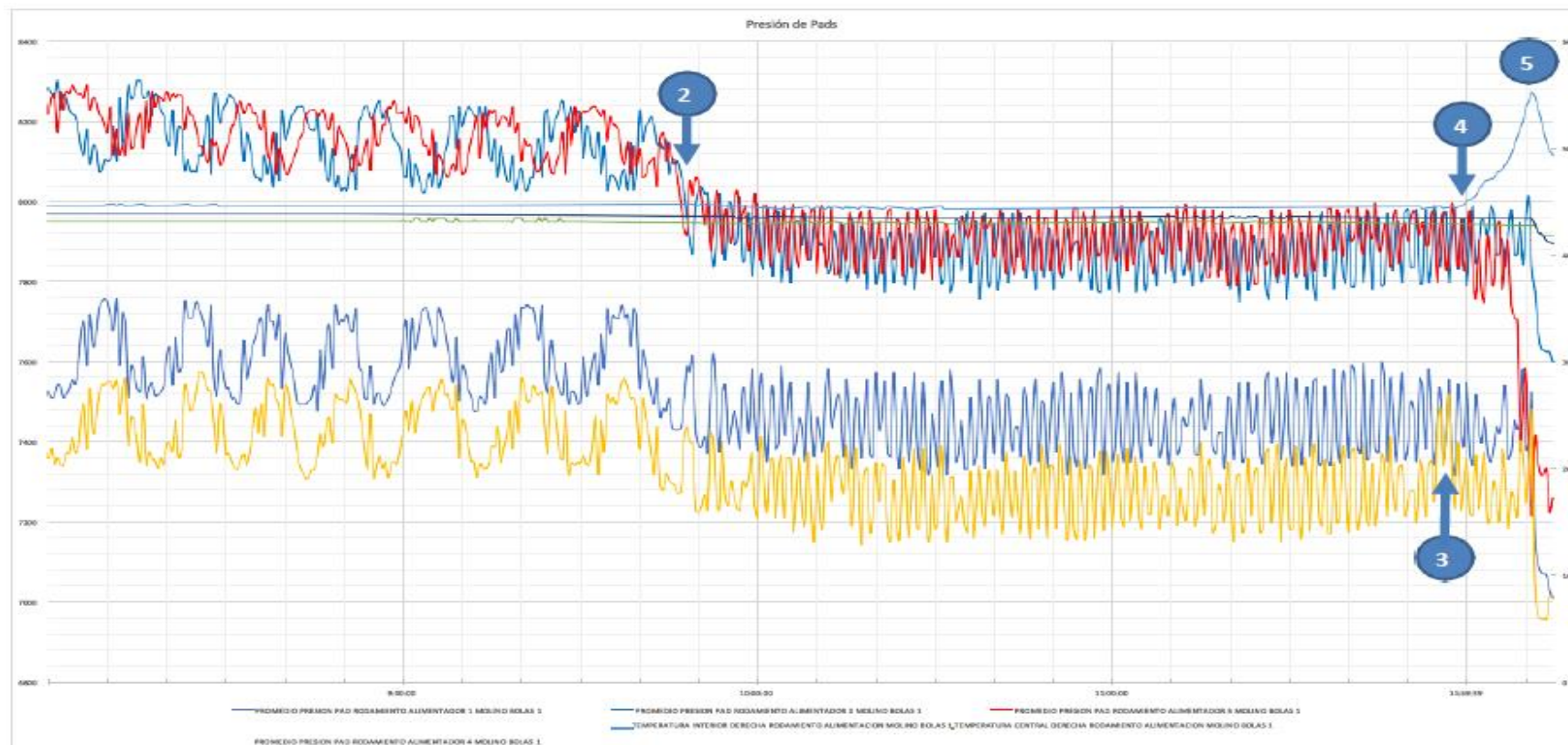
1. 05/01/2020 13:38:00; Corte de energía por descarga atmosférica duración 1.8Hrs.
2. 06/01/2020 09:40:00; ligera disminución de presión en Pad's de alimentación, baja la velocidad del molino (11.6 a 11.3RPM) e incremento de corriente (2473 a 2557Amp).
3. 06/01/2020 11:53:00 – 11:57:00; Presión en Pad 4, ligero incremento de presión (100Kpa aprox.)
4. 06/01/2020 11:58:00 – 12:10:00; inicia incremento de temperatura en lado interno izquierdo e interno derecho del Trunnion de alimentación, en 12 min llega a 55°C, generando trip por alta temperatura en Trunnion.
5. 06/01/2020 12:10:00, trip por alta temperatura
6. 06/01/2020 12:23:00 primer arranque (Prueba para descarte de falla en los sensores de temperatura)
7. 06/01/2020 12:33:00 trip por alta temperatura
8. 06/01/2020 12:41:00, segundo arranque (nueva prueba para descartar problemas en el sistema de lubricación)
9. 06/01/2020 13:03:00 Trip por alta temperatura (inspección de trunnion)

Presión en los PADs

En la figura 27 se grafica la de Presión de PADs el día previo a la falla:

Figura 27:

Tendencia de presión en los PADs del trunion de alimentación del molino 310MLB001, previo y día de falla.

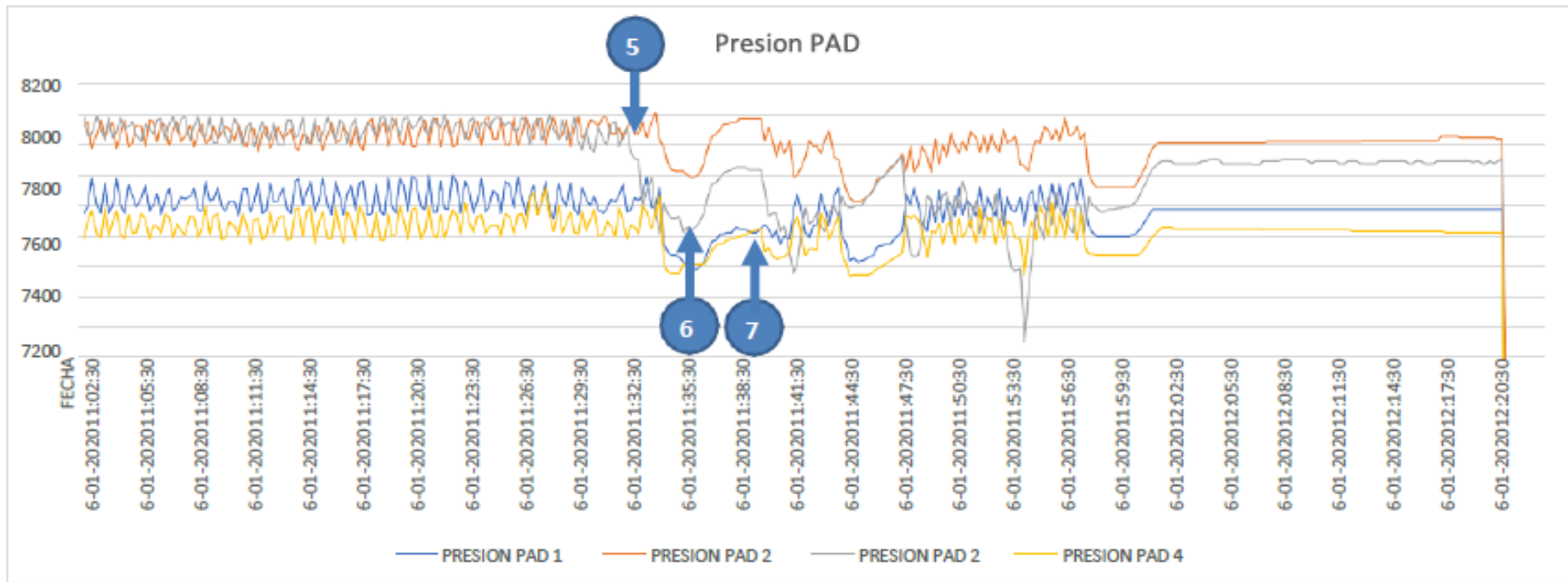


Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla.

En la figura 28 se grafica las presiones en el trunnion de alimentación el día de la falla:

Figura 28

Tendencia de presión en los PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001, el día de la falla

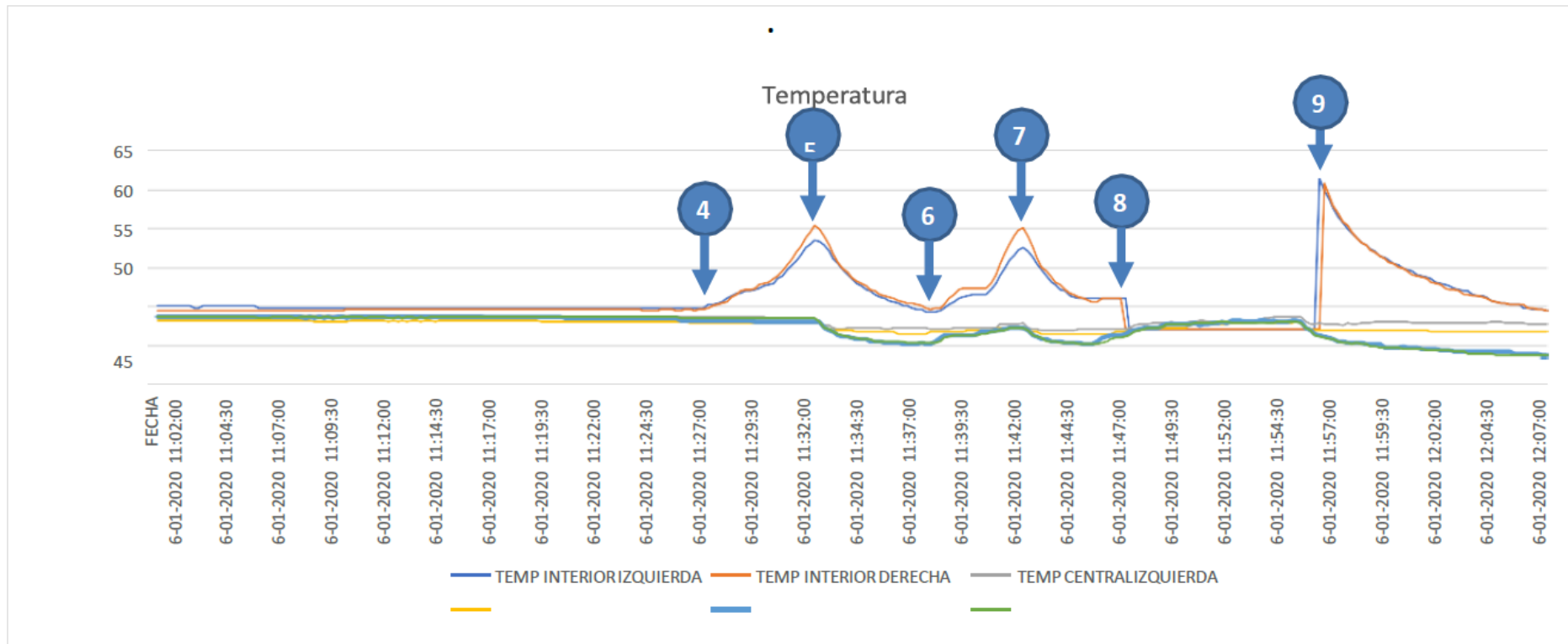


Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla

En la figura 29 se grafica la tendencia de temperaturas en el trunnion de alimentación el día de la falla:

Figura 29

Tendencia de temperaturas en los PADs del trunnion de alimentación del molino 310MLB001, el día de la falla



Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla.

En la figura 30 se grafica de corriente del estator del motor y velocidad de giro del molino el día de la falla:

Figura 30:

Tendencia de la corriente del motor comparado con la velocidad del molino del molino 310MLB001, el día de la falla.



Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla.

Con estos gráficos se demuestra que la detención del molino fue ocasionada por Trip de temperatura en el trunnion de alimentación.

Causas de la falla:

1. Ingreso de material extraño en el espacio entre el PAD y Trunnion. FLS como diseñador del molino apoya en el análisis de falla.

Consecuencia:

1. Daño en PADs 3 y 4 de lado alimentación, pérdida de producción en la línea 1 de molienda (detención del molino SAG MLS001 y molino de bolas MLB001).

Planes de acción:

Corto plazo

1. Reuniones y ACR multidisciplinario.

Largo plazo

1. Mejora en el programa de Mantenimiento del Trunnion, PADs, Limpiadores de los Molinos de la Concentradora.
2. Control estricto del mantenimiento preventivo y de los parámetros operativos del trunnion en los Molinos de la Planta Concentradora.

Hipótesis de fallas:

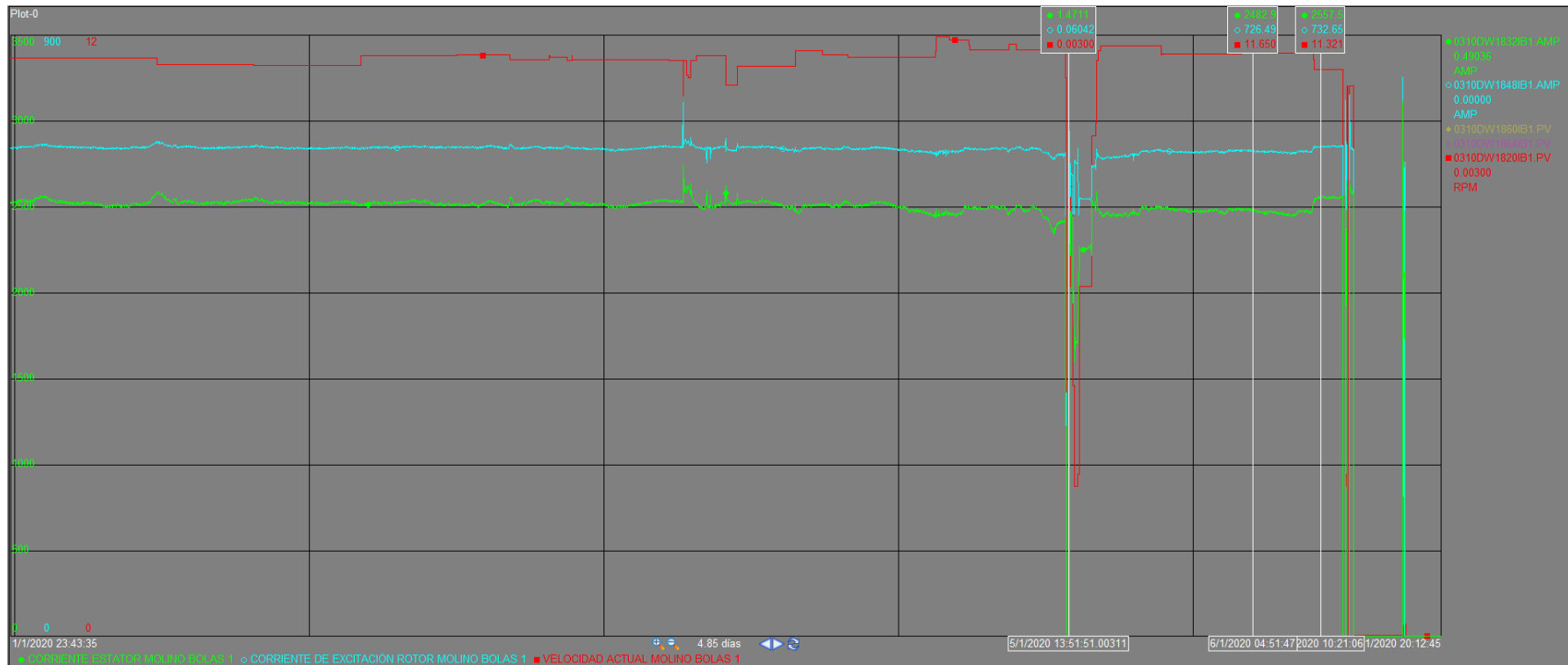
1. Descarga Eléctrica a los PADs
2. Baja Presión del Sistema de Lubricación y Levante de PADS lado alimentación
3. Degradación del aceite de lubricación genera inadecuada formación de película lubricante
4. Ingreso de cuerpos externos desde los sellos hacia interior de PAD 3 o PAD 4.
5. Ingreso de cuerpos externos por el sistema de lubricación (saturación de filtros)
6. Desplazamientos irregulares en el entrehierro del motor Gearless, pueden generar rotura de película lubricante en PADs
7. Desprendimiento súbito de un cuerpo o grano del mismo PAD (bronce con problemas de fundición o fabricación)

8. Análisis de desgaste y propiedades mecánicas del sello usado y nuevo del Trunnion.

Hipótesis 1: Las corrientes en el estator y rotor se mantuvieron estables durante todo el desarrollo del evento, esto se verifica en la figura 31.

Figura 31

Tendencia de la corriente en el motor del molino 310MLB001, el día de la falla

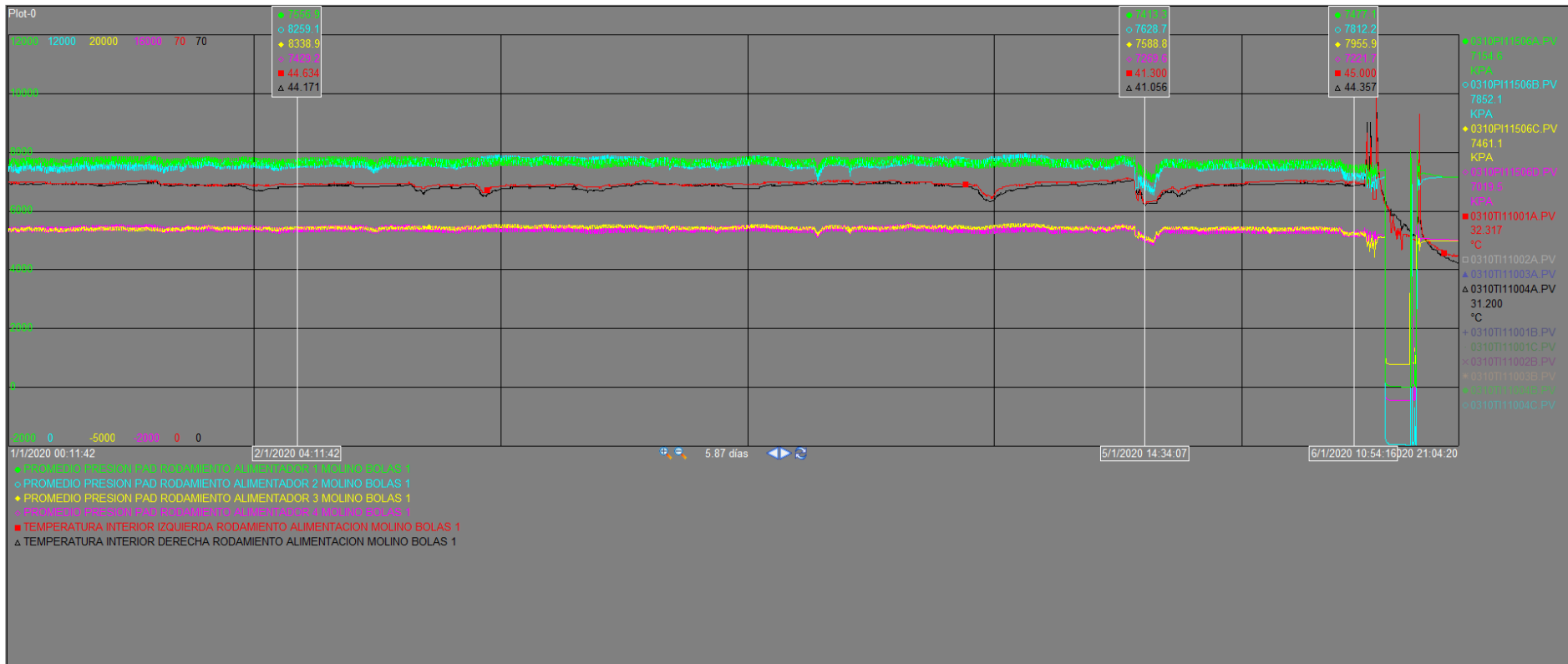


Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla.

Hipótesis 2: Las presiones y temperaturas en los PADS del trunnion de alimentación se mantuvieron estables hasta el momento de ocurrencia del evento catastrófico, en la figura 32 se observa estas tendencias.

Figura 32

Tendencia de la presión y temperaturas en los PADS del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla



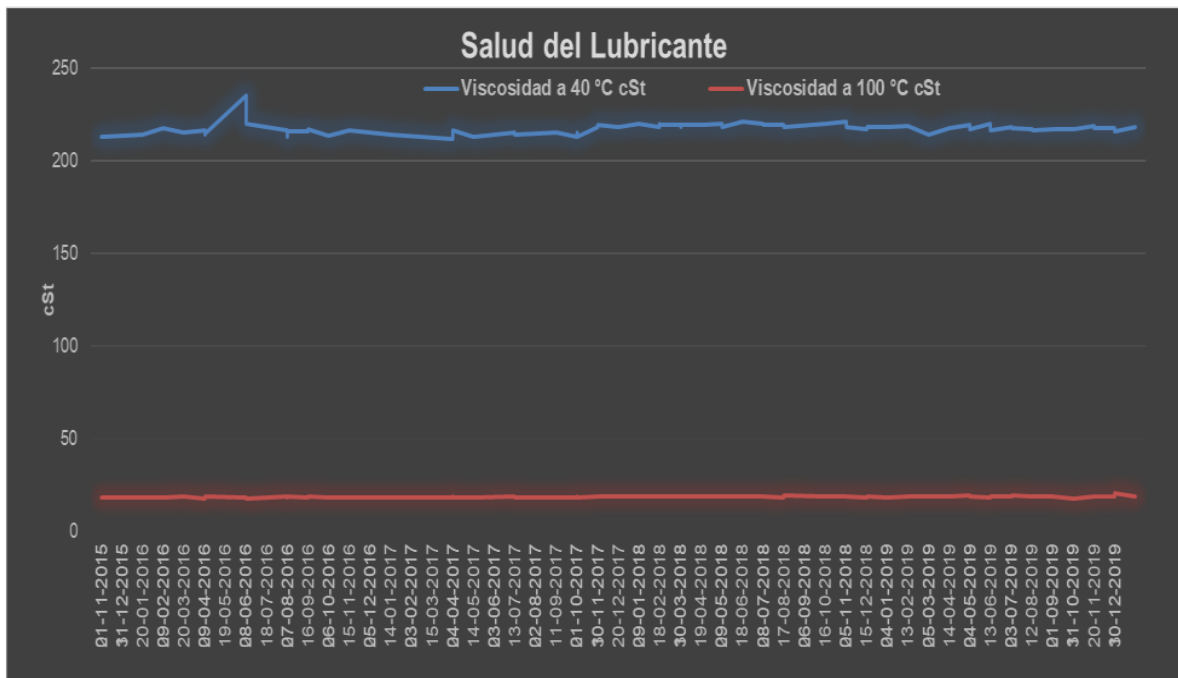
Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla

Hipótesis 3: En cuanto a la hipótesis de degradación del aceite y como consecuencia perdida de la película de aceite se tiene que:

La Viscosidad, Conteo de partículas, elementos de desgaste y contaminación, estuvieron con ligeras variaciones, pero controladas mediante el dializado frecuente, la última muestra del 06 de enero es donde se aprecia el incremento brusco del particulado y del contenido de metales (Fierro), esta tendencia es graficada en la figura 33, 34, 35 y 36.

Figura 33

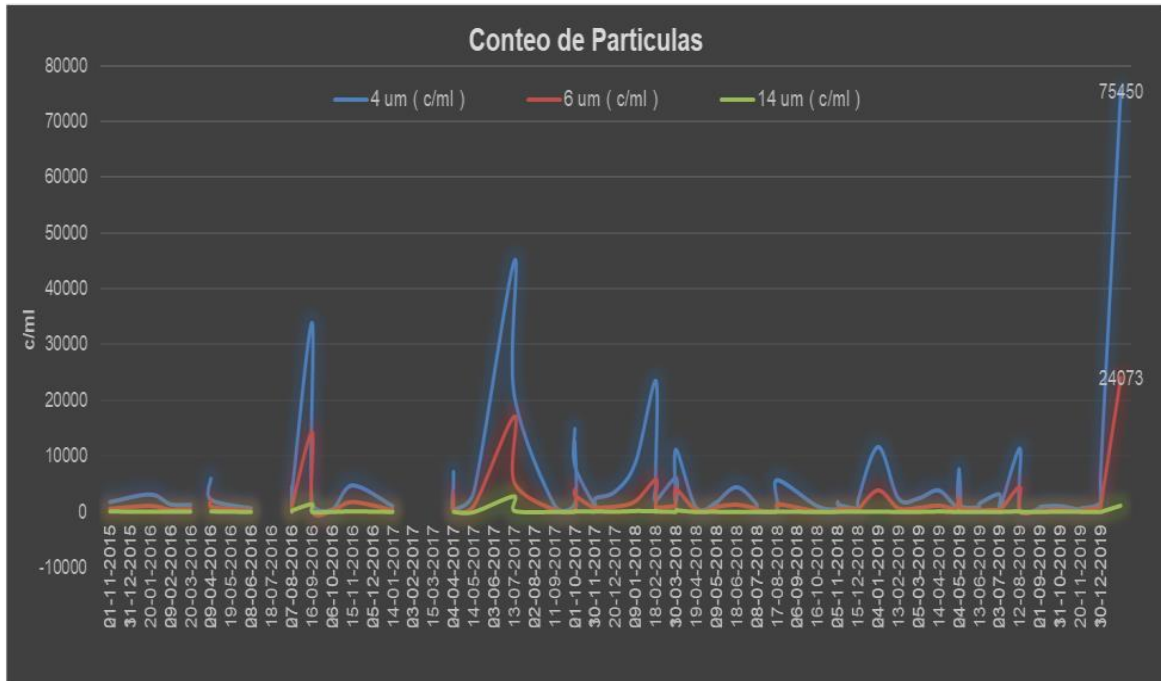
Tendencia de viscosidad del aceite hidráulico del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla



Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla

Figura 34

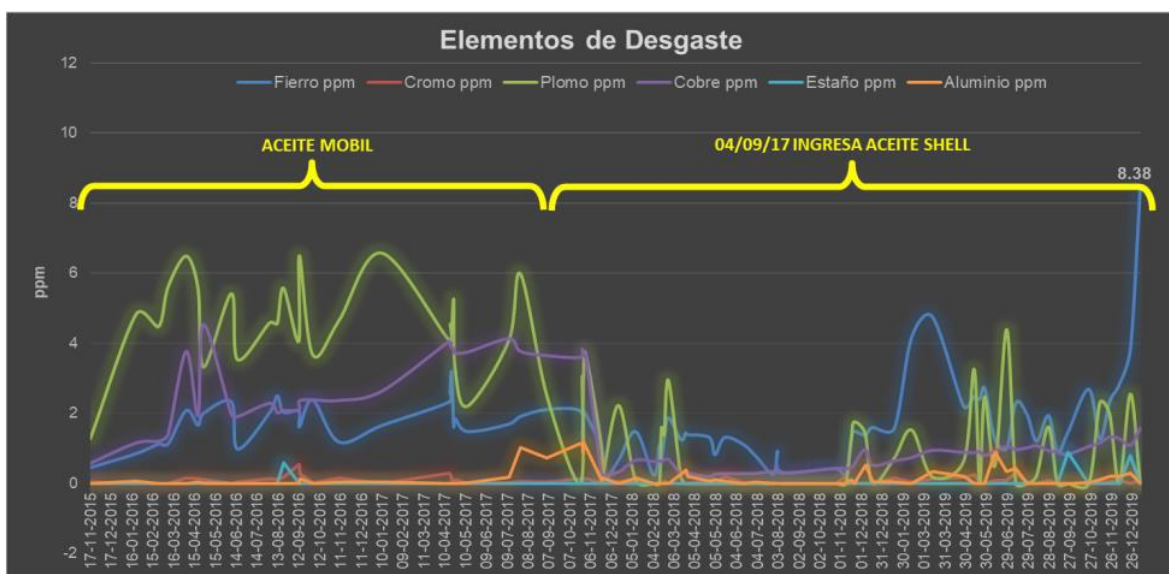
Tendencia del conteo de partículas en el aceite hidráulico del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla



Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla.

Figura 35

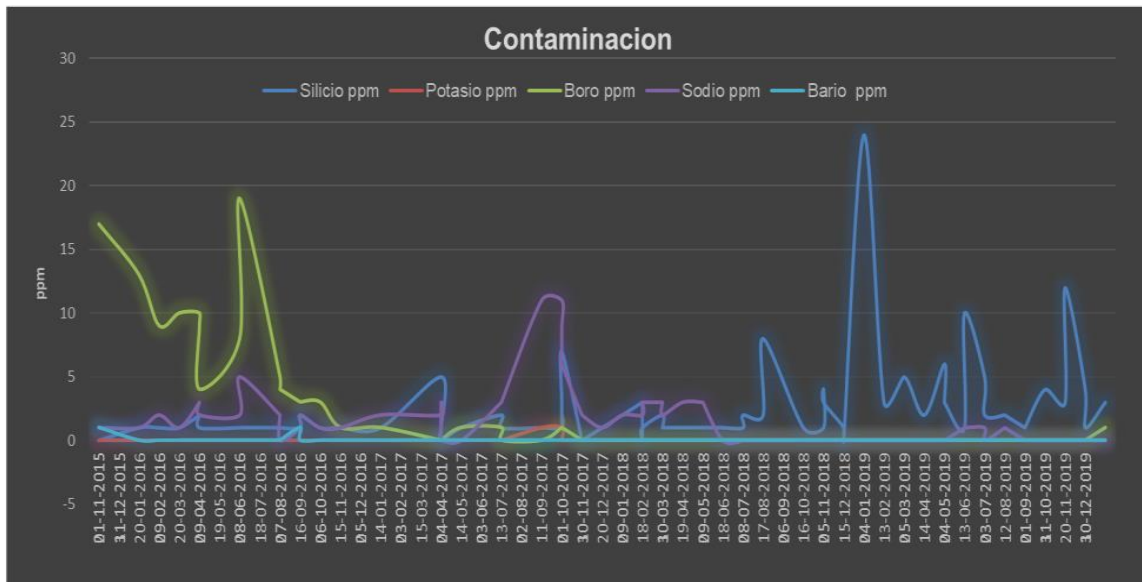
Tendencia del conteo de partículas de los elementos de desgaste en el aceite hidráulico del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla



Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla.

Figura 36

Tendencia del conteo de partículas contaminantes en el aceite hidráulico del molino 310MLB001, antes y en el momento de la falla.



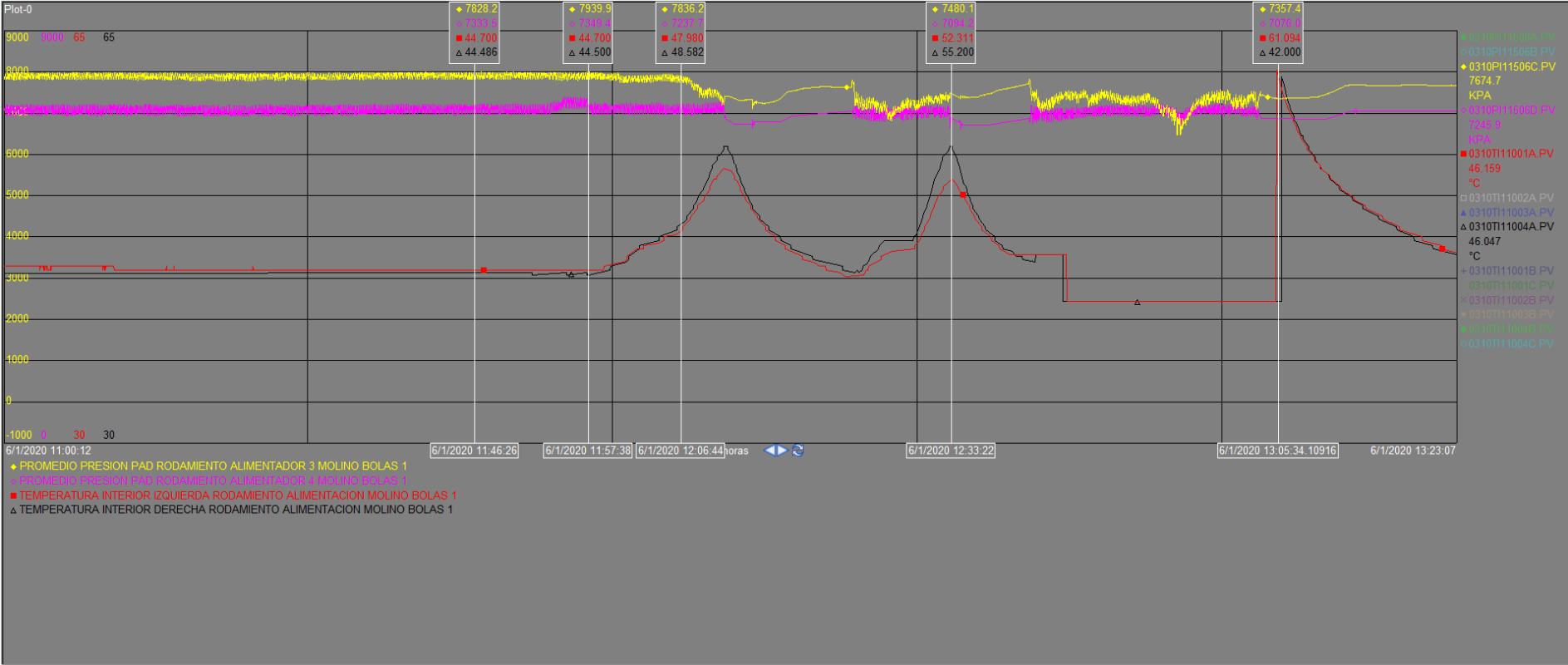
Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla.

Hipótesis 4: En cuanto al de ingreso de algún material extraño en la zona entre el trunnion y el PAD se tiene:

La lógica de eventos previos como el incremento de la presión en PAD4, luego el incremento de temperatura, la disminución de presión en el PAD3 y el trip por alta temperatura (55°C) nos permite considerar la probabilidad que un elemento metálico haya ingresado por el PAD4 a la vez haya generado cierta restricción (incremento de presión) y luego cuando se haya liberado (vuelve a su presión normal) expulsando este elemento metálico y por rebose se haya ubicado en el PAD3, generándose la fundición puntual del PAD con el trunnion. En la figura 37 se observa las tendencias de presión y temperatura en el momento de la falla.

Figura 37

Tendencia de presión y temperatura en los PADs del molino 310MLB001 en el momento de la falla


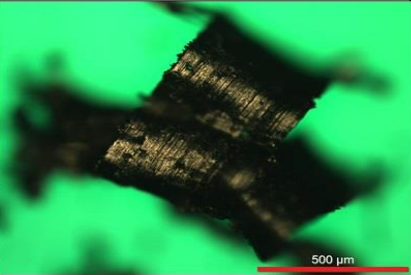
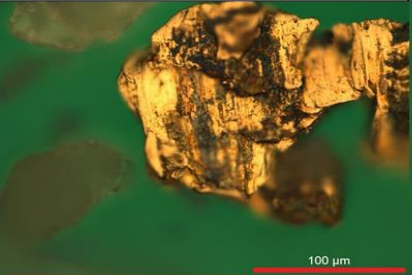
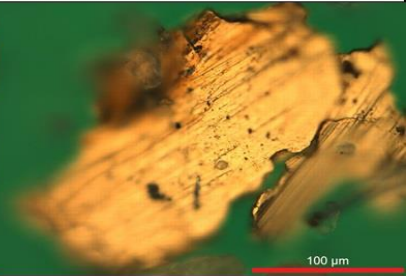
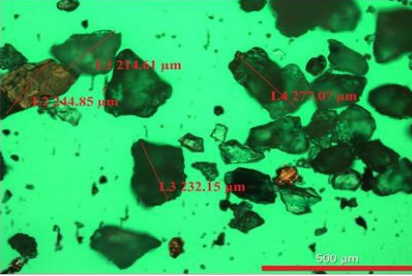
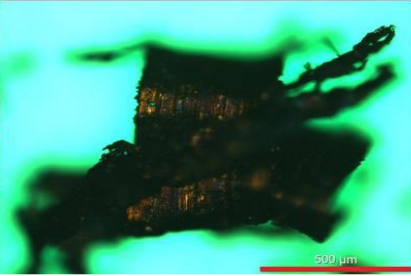
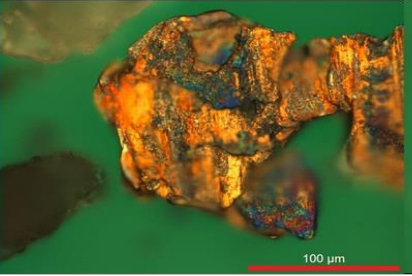



Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla

Hipótesis 5: en cuanto al ingreso de partículas extrañas por el sistema de lubricación del molino, se tiene que los filtros se encontraron saturados luego de ocurrido el evento, previamente no se tienen alarmas en la presión diferencial del sistema de lubricación. En la figura 38 se muestra las partículas identificadas en los filtros del sistema de lubricación.

Figura 38

Muestras de partículas encontradas en los PADs del molino 310MLB001 en el momento de la falla

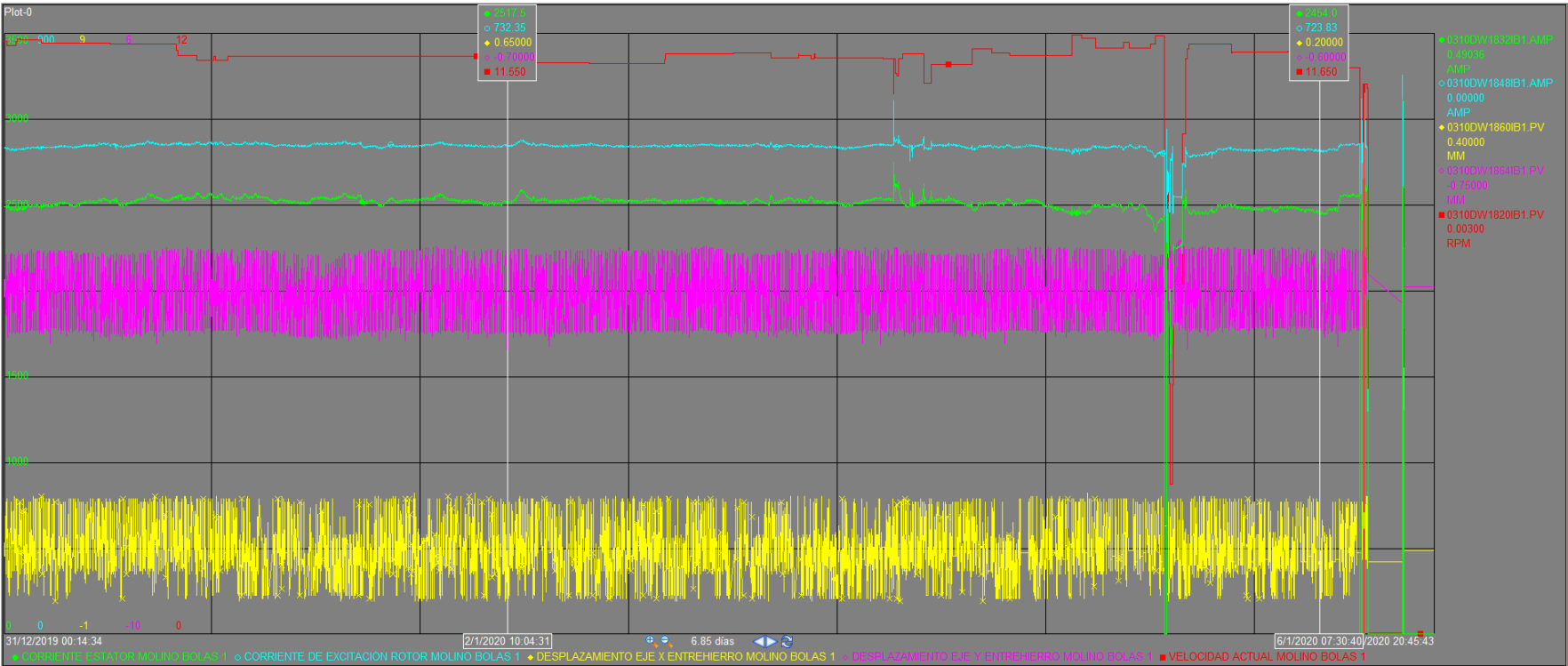
REPORTE DE FERROGRAFIA									
CLIENTE:	MMG PLANTA	EQUIPO:	MOLINO	HOROMETRO:	HORAS MUESTREO:	FECHA MUESTREO:	11/01/2020	PM:	
DESCRIPCIÓN:		Critica presencia de Hierro en forma de trozos <10cm. Critica presencia de Cobre en forma de trozos incrustados dentro del hierro y libre <5cm. Critica contaminacion de polvo.							
RECOMENDACIÓN:									
MUESTRA ADHERIDA AL PAD # 03									
Critica presencia de Hierro		Critica presencia de Hierro		Critica presencia de Cobre		Critica presencia de Cobre			
Desgaste por Fatiga, abrasivo y Adhesivo		100X - Desgaste adhesivo.		500X - Desgaste por fatiga y Adhesivo.		500X - Desgaste por fatiga y Adhesivo.			
									
Critica presencia de Polvo		TRATAMIENTO TERMICO		TRATAMIENTO TERMICO		TRATAMIENTO TERMICO			
100X - Contaminacion con polvo.		100X - Desgaste adhesivo.		500X - Desgaste por fatiga y Adhesivo.		500X - Desgaste por fatiga y Adhesivo.			
									

Fuente: Datos del área de confiabilidad de Minera Las Bambas

Hipótesis 6: En cuanto al desplazamiento del entrehierro en el motor Gearless del molino se comprueba que estos desplazamientos estuvieron dentro de los rangos operativos, los datos son proporcionados por los sensores de medición de los AirGaps, esto se muestra en la figura 39.

Figura 39

Tendencia de las mediciones de la luz entre el rotor y estator del molino 310MLB001 en el momento de la falla



Fuente: Datos del PI SYSTEM de Minera Las Bambas para el día de la falla

Hipótesis 7: En cuanto a la hipótesis del súbito desprendimiento de partes del mismo PAD, se aprecia algunas porosidades en el cuerpo principal del PAD 3 y PAD4, esta posibilidad es muy infrecuente dado que estas porosidades existen en cuerpos fundidos de estos tamaños y la parte observada no está en contacto con el trunnion. Las fotos se muestran en la figura 40.

Figura 40

Observaciones a la calidad en la fabricación del PAD.



Fuente: Datos del área de confiabilidad de Minera Las Bambas.

Hipótesis 8: En cuanto a la hipótesis de ingreso de elementos extraños a través de los sellos trunnion, se tiene:

Existe la probabilidad de ingreso de elementos extraños a través de este sello sin embargo la evidencia y conservación del sello hace indicar que el ingreso de material extraño no fue por esta zona de los sellos. La figura 41 muestra los sellos en condiciones aceptables.

Figura 41

Sello de Trunnion



Fuente: Datos del área de Mantenimiento de Minera Las Bambas

Capítulo IV. Resultados, Contrastaciones de Hipótesis y

Discusión de Resultados

4.1 Resultados

Reemplazando los PADs del trunnion con falla lo que indica el procedimiento de cambio es llevar a cabo la calibración de los PADs, teniendo en cuenta que el diferencial de presión de un PAD con la presión promedio total de los cuatro PADs no debe exceder el 5% en estado estático y el 10% en estado dinámico.

Datos obtenidos en la calibración de PADs en el molino de bolas 310MLB001 de Minera Las Bambas, realizado por FLSmidth se muestran en la tabla 10 y figura 42.

Tabla 10

Resultados de calibración de PADs del molino de bolas 310MLB001

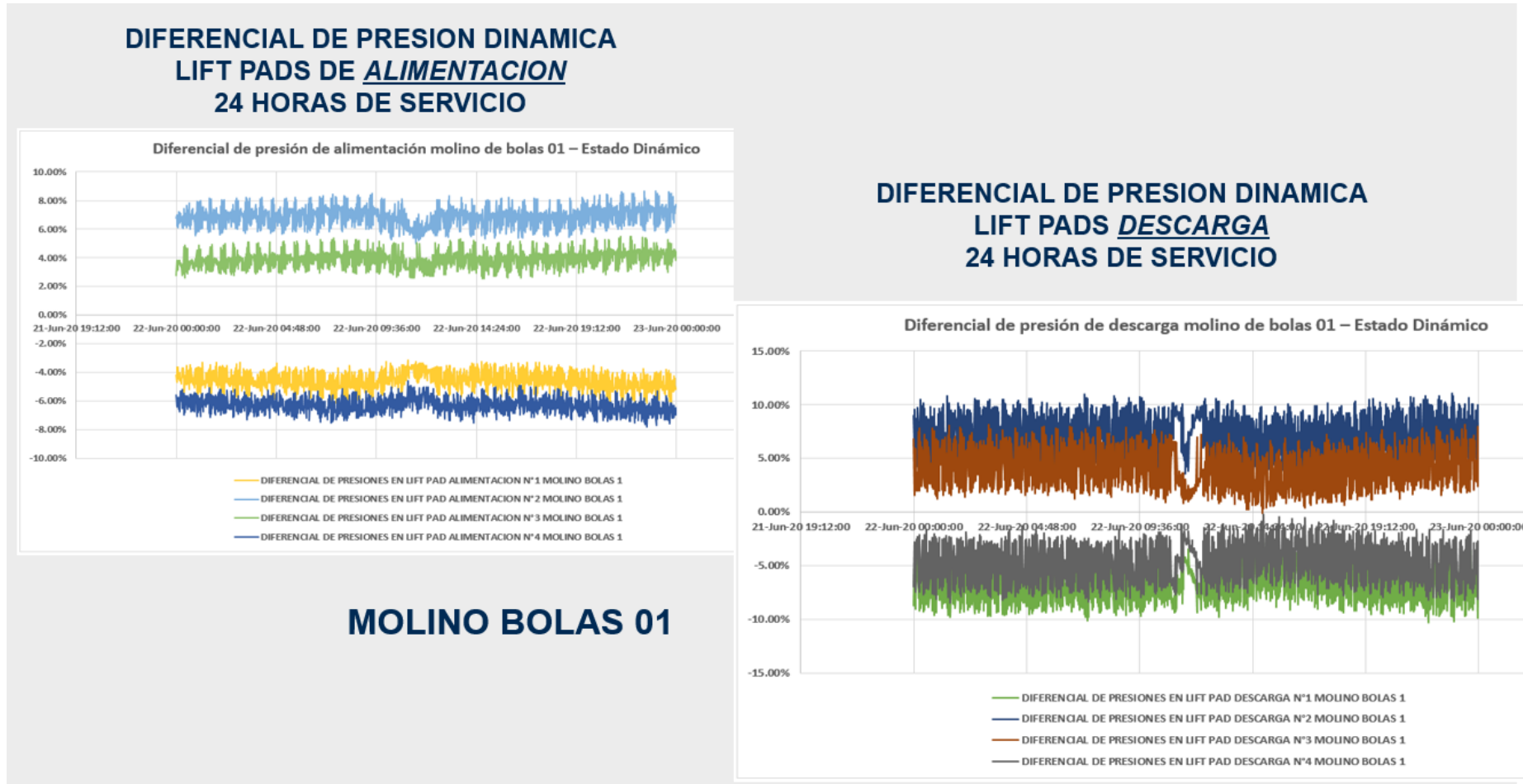
MOLINO DE BOLAS 1	DIFERENCIAL DE PRESION ESTATICA ANTES DE LA CALIBRACION																			
	KPA				KPA				KPA				KPA				KPA			
	Fecha	PROMEDIO TOTAL PRESION PAD ALIMENTACION MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO ALIMENTACION A1 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO ALIMENTACION A2 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO ALIMENTACION A3 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO ALIMENTACION A4 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION A1 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION A2 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION A3 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION A4 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO TOTAL PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA A6 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA A7 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA A8 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA A9 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL DESCARGA A6 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL DESCARGA A7 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL DESCARGA A8 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL DESCARGA A9 MOLINO BOLAS 1	
20-Jun-20 08:30:00	6582.19	6278.08	6904.95	6834.82	6384.77	-4.62%	4.90%	3.84%	-3.00%	6190.34	6535.42	5719.16	5998.83	6558.30	5.57%	-7.61%	-3.09%	5.94%		
20-Jun-20 08:31:00	6578.43	6277.59	6894.38	6833.50	6384.19	-4.57%	4.80%	3.88%	-2.95%	6190.34	6534.09	5718.26	5997.85	6557.83	5.55%	-7.63%	-3.11%	5.94%		
20-Jun-20 08:32:00	6577.37	6277.11	6893.85	6832.17	6383.60	-4.56%	4.81%	3.87%	-2.95%	6190.34	6532.76	5717.36	5996.87	6557.35	5.53%	-7.64%	-3.13%	5.93%		
20-Jun-20 08:33:00	6577.37	6276.62	6893.31	6830.83	6383.01	-4.57%	4.80%	3.85%	-2.95%	6190.34	6531.42	5716.46	5995.89	6556.88	5.51%	-7.66%	-3.14%	5.92%		
20-Jun-20 08:34:00	6577.37	6276.14	6892.77	6829.50	6382.43	-4.58%	4.80%	3.83%	-2.96%	6190.34	6530.09	5715.56	5994.91	6556.41	5.49%	-7.67%	-3.16%	5.91%		
20-Jun-20 08:35:00	6577.37	6275.65	6892.24	6828.17	6381.84	-4.59%	4.79%	3.81%	-2.97%	6190.34	6528.76	5714.66	5993.93	6555.94	5.47%	-7.68%	-3.17%	5.91%		
20-Jun-20 08:36:00	6577.37	6275.17	6891.70	6826.84	6381.25	-4.59%	4.78%	3.79%	-2.98%	6190.34	6527.43	5713.77	5992.94	6555.46	5.45%	-7.70%	-3.19%	5.90%		
20-Jun-20 08:37:00	6577.37	6274.68	6891.17	6825.52	6380.67	-4.60%	4.77%	3.77%	-2.99%	6190.34	6526.10	5712.87	5991.96	6554.99	5.42%	-7.71%	-3.20%	5.89%		
20-Jun-20 08:38:00	6577.37	6274.20	6890.63	6824.19	6380.08	-4.61%	4.76%	3.75%	-3.00%	6190.34	6524.77	5711.97	5990.98	6554.52	5.40%	-7.73%	-3.22%	5.88%		
20-Jun-20 08:39:00	6577.37	6273.71	6890.09	6822.85	6379.49	-4.62%	4.75%	3.73%	-3.01%	6190.34	6523.44	5711.07	5990.00	6554.05	5.38%	-7.74%	-3.24%	5.88%		
20-Jun-20 08:40:00	6577.37	6273.23	6889.56	6822.40	6378.91	-4.62%	4.75%	3.73%	-3.02%	6190.34	6522.11	5710.17	5989.02	6553.57	5.36%	-7.76%	-3.25%	5.87%		
20-Jun-20 08:41:00	6577.37	6272.74	6889.02	6822.02	6378.32	-4.63%	4.74%	3.72%	-3.03%	6190.34	6520.78	5709.27	5988.04	6553.10	5.34%	-7.77%	-3.27%	5.86%		
20-Jun-20 08:42:00	6577.37	6272.26	6888.48	6821.65	6377.73	-4.64%	4.73%	3.71%	-3.04%	6190.34	6519.45	5708.37	5987.06	6552.63	5.32%	-7.79%	-3.28%	5.85%		
20-Jun-20 08:43:00	6577.37	6271.77	6887.95	6821.27	6377.15	-4.65%	4.72%	3.71%	-3.04%	6190.34	6518.12	5707.47	5986.08	6552.16	5.29%	-7.80%	-3.30%	5.84%		
20-Jun-20 08:44:00	6577.37	6271.29	6887.41	6820.90	6376.56	-4.65%	4.71%	3.70%	-3.05%	6190.34	6516.79	5706.57	5985.10	6551.68	5.27%	-7.81%	-3.32%	5.84%		
20-Jun-20 08:45:00	6577.37	6270.80	6886.87	6820.52	6375.97	-4.66%	4.71%	3.70%	-3.06%	6190.34	6515.46	5705.67	5984.12	6551.21	5.25%	-7.83%	-3.33%	5.83%		
20-Jun-20 08:46:00	6577.37	6270.32	6886.34	6820.14	6375.39	-4.67%	4.70%	3.69%	-3.07%	6190.34	6514.12	5704.77	5983.14	6550.74	5.23%	-7.84%	-3.35%	5.82%		
20-Jun-20 08:47:00	6577.37	6269.83	6885.80	6819.77	6374.80	-4.68%	4.69%	3.69%	-3.08%	6190.34	6512.79	5703.87	5982.16	6550.26	5.21%	-7.86%	-3.36%	5.81%		
20-Jun-20 08:48:00	6577.37	6269.35	6885.26	6819.39	6374.21	-4.68%	4.68%	3.68%	-3.09%	6190.34	6511.46	5702.97	5981.18	6549.79	5.19%	-7.87%	-3.38%	5.81%		
20-Jun-20 08:49:00	6577.37	6268.86	6884.73	6819.01	6373.63	-4.69%	4.67%	3.67%	-3.10%	6190.34	6510.13	5702.07	5980.20	6549.32	5.17%	-7.89%	-3.39%	5.80%		
20-Jun-20 08:50:00	6577.37	6268.38	6884.19	6818.64	6373.04	-4.70%	4.66%	3.67%	-3.11%	6190.34	6508.80	5701.18	5979.21	6548.85	5.14%	-7.90%	-3.41%	5.79%		

MOLINO DE BOLAS 1	DIFERENCIAL DE PRESION ESTATICA DESPUES DE LA CALIBRACION																			
	KPA				KPA				KPA				KPA				KPA			
	Fecha	PROMEDIO TOTAL PRESION PAD ALIMENTACION MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO ALIMENTACION A1 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO ALIMENTACION A2 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO ALIMENTACION A3 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO ALIMENTACION A4 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION A1 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION A2 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION A3 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL ALIMENTACION A4 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO TOTAL PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA A6 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA A7 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA A8 MOLINO BOLAS 1	PROMEDIO PRESION PAD RODAMIENTO DESCARGA A9 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL DESCARGA A6 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL DESCARGA A7 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL DESCARGA A8 MOLINO BOLAS 1	PORCENTAJE DE PRESION DIFERENCIAL DESCARGA A9 MOLINO BOLAS 1	
20-Jun-20 20:40:00	6563.40	6350.42	6790.83	6616.92	6468.79	-3.25%	3.47%	0.82%	-1.44%	6088.60	6092.12	6099.94	5820.24	6383.85	0.06%	0.19%	-4.41%	4.85%		
20-Jun-20 20:41:00	6563.40	6349.90	6790.83	6617.54	6467.84	-3.25%	3.47%	0.82%	-1.46%	6085.66	6090.62	6100.61	5821.27	6383.85	0.08%	0.25%	-4.34%	4.90%		
20-Jun-20 20:42:00	6563.40	6349.39	6790.83	6618.16	6466.88	-3.26%	3.47%	0.83%	-1.47%	6084.43	6089.11	6101.28	5822.30	6383.85	0.08%	0.28%	-4.31%	4.92%		
20-Jun-20 20:43:00	6563.40	6348.87	6790.83	6618.79	6465.92	-3.27%	3.47%	0.84%	-1.49%	6083.20	6087.61	6101.95	5823.32	6383.85	0.07%	0.31%	-4.27%	4.94%		
20-Jun-20 20:44:00	6557.42	6348.36	6790.83	6619.41	6464.97	-3.19%	3.56%	0.95%	-1.41%	6081.97	6086.11	6102.63	5824.35	6375.75	0.07%	0.34%	-4.24%	4.83%		
20-Jun-20 20:45:00	6557.42	6347.84	6790.83	6620.03	6464.01	-3.20%	3.56%	0.95%	-1.42%	6080.74	6084.60	6103.30	5825.37	6373.22	0.06%	0.37%	-4.20%	4.81%		
20-Jun-20 20:46:00	6557.42	6347.33	6790.83	6620.65	6463.05	-3.20%	3.56%	0.96%	-1.44%	6079.51	6083.10	6103.97	5826.40	6370.69	0.06%	0.40%	-4.16%	4.79%		
20-Jun-20 20:47:00	6557.42	6346.82	6790.83	6621.28	6462.10	-3.21%	3.56%	0.97%	-1.45%	6078.29	6081.60	6104.64	5827.42	6368.16	0.05%	0.43%	-4.13%	4.77%		
20-Jun-20 20:48:00	6557.42	6346.30	6790.83	6621.90	6461.14	-3.22%	3.56%	0.98%	-1.47%	6077.53	6080.10	6105.31	5828.45	6365.63	0.04%	0.46%	-4.10%	4.74%		
20-Jun-20 20:49:00	6557.42	6345.79	6790.83	6622.52	6460.18	-3.23%	3.56%	0.99%	-1.48%	6076.68	6078.59	6105.98	5829.48	6363.10	0.03%	0.48%	-4.07%	4.71%		
20-Jun-20 20:50:00	6557.42	6345.27	6790.83	6623.15	6459.23	-3.24%	3.56%	1.00%	-1.50%	6075.83	6077.09	6106.66	5830.50	6360.57	0.02%	0.51%	-4.04%	4.69%		
20-Jun-20 20:51:00	6557.42	6344.76	6790.83	6623.77	6458.27	-3.24%	3.56%	1.01%	-1.51%	6074.98	6075.59	6107.33	5831.53	6358.04	0.01%	0.53%	-4.01%	4.66%		
20-Jun-20 20:52:00	6557.42	6344.24	6790.83	6624.39	6457.31	-3.25%	3.56%	1.02%	-1.53%	6074.08	6074.08	6108.00	5832.55	6355.51	-0.04%	0.52%	-4.01%	4.59%		
20-Jun-20 20:53:00	6557.42	6343.73	6790.83	6625.01	6456.36	-3.26%	3.56%	1.03%	-1.54%	6073.42	6072.58	6108.67	5833.58	6352.98	-0.10%	0.50%	-4.03%	4.52%		
20-Jun-20 20:54:00	6557.42	6343.21	6790.83	6625.64	6455.40	-3.27%	3.56%	1.04%	-1.56%	6072.49	6071.08	6109.34	5834.60	6350.45	-0.09%	0.54%	-3.98%	4.51%		
20-Jun-20 20:55:00	6557.42	6342.70	6790.83	6626.26	6454.44	-3.27%	3.56%	1.05%	-1.57%	6071.64	6069.57	6110.01	5835.63	6347.92	-0.08%	0.58%	-3.93%	4.50%		
20-Jun-20 20:56:00	6557.42	6342.18	6790.83	6626.88	6453.49	-3.28%	3.56%	1.06%	-1.58%	6070.67	6068.07	6110.68	5836.66	6345.39	-0.11%	0.59%	-3.92%	4.46%		
20-Jun-20 20:57:00	6557.42	6341.67	6790.83	6627.50	6452.53	-3.29%	3.56%	1.07%	-1.60%	6070.64	6066.57	6111.36	5837.68	6342.84	-0.13%	0.60%	-3.90%	4.29%		
20-Jun-20 20:58:00	6557.42	6341.16	6790.83	6628.13	6451.58	-3.30%	3.56%	1.08%	-1.61%	6068.65	6065.06	6112.03	5838.71	6339.33	-0.06%	0.71%	-3.79%	4.36%		
20-Jun-20 20:59:00	6557.42	6340.64	6790.83	6628.75	6450.62	-3.31%	3.56%	1.09%	-1.63%	6068.65	6063.56	6112.70	5839.73	6331.42	-0.06%	0.73%	-3.77%	4.33%		
20-Jun-20 21:00:00	6557.42	6340.13	6790.83	6629.37	6449.66	-3.31%	3.56%	1.10%	-1.64%	6070.65	6062.06	6113.37	5840.76	6329.52	-0.14%	0.70%	-3.79%	4.26%		

Fuente: Informe de trabajo realizado por FLSmdth (06/2020) en el molino de bolas 310MLB001

Figura 42

Grafica de presiones en los PADs luego de la calibración realizada por FLSmidth en el molino 310MLB001



Fuente: Informe de trabajo realizado por FLSmidth (06/2020) en el molino de bolas 310MLB001

Asimismo, se demuestra que cumpliendo los mantenimientos preventivos indicados en el manual del molino la disponibilidad no debe ser menor al 95% para el periodo de un año. Este porcentaje es el resultado del bench marking con otras mineras que cuentan con molinos similares. En la Tabla 11 se muestra las disponibilidades de los equipos de Minera Antamina para el año 2021.

Tabla 11

Resultados de disponibilidades de equipos en Planta Concentradora de 150Ktpd

Item	Flota	31/12/2021								
		Día		Semana		Mes		Año YTD		
		Real	Forecast	Real	Forecast	Real	Forecast	Real	Budget	Dif %
1	Chancadora Primaria	100.0	99.1	100.0	99.1	100.0	98.1	96.8	94.5	2.5%
2	Faja Transportadora CVB001	100.0	99.1	95.6	99.1	98.9	98.1	96.4	94.4	2.1%
3	Faja Transportadora CVB623	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.1	96.8	94.3	2.7%
4	Faja Transportadora CVB624	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.1	97.1	94.3	3.0%
5	Faja Transportadora CVB002	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	98.1	97.0	2.8%
6	Faja Transportadora CVB004	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.3	100.0	95.2	5.0%
7	Molino Sag 1	100.0	99.0	100.0	99.0	100.0	99.2	100.0	93.3	7.2%
8	Planta Pebbles	100.0	99.2	100.0	99.2	100.0	75.0	100.0	78.4	27.6%
9	Faja Transportadora CVB626	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.3	100.0	95.0	5.3%
10	Faja Transportadora CVB628	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.3	100.0	95.0	5.2%
11	Molino Sag 2	98.5	99.0	99.6	99.0	98.5	99.2	98.5	94.2	4.6%
12	Molino Bolas 1	100.0	99.0	100.0	99.0	100.0	98.5	100.0	94.3	6.1%
13	Molino Bolas 2	100.0	99.0	100.0	99.0	100.0	98.9	100.0	95.4	4.9%
14	Molino Bolas 3	100.0	99.0	97.2	95.4	100.0	98.1	100.0	86.0	16.3%
15	Molino Bolas 4	100.0	99.0	100.0	97.2	100.0	98.5	100.0	94.8	5.5%
16	Filtros Larox n.1	98.3	100.0	97.6	100.0	94.7	90.1	82.7	81.8	1.1%
17	Filtros Larox n.2	100.0	50.0	98.9	78.6	95.9	85.2	88.5	84.6	4.6%
18	Filtros Larox n.3	89.4	100.0	86.8	71.4	92.1	88.4	83.9	81.8	2.5%
19	Filtros Larox n.4	86.5	100.0	85.1	85.7	75.9	59.4	89.6	84.6	5.9%
20	Cargador 988 G - LD009	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	91.4	95.9	86.9	10.3%
21	Cargador 988 H - LD013	100.0	100.0	96.4	85.7	75.0	91.4	88.6	88.2	0.4%
22	Cargador 988 H - LD019	100.0	100.0	100.0	100.0	70.8	93.0	98.2	90.3	8.8%

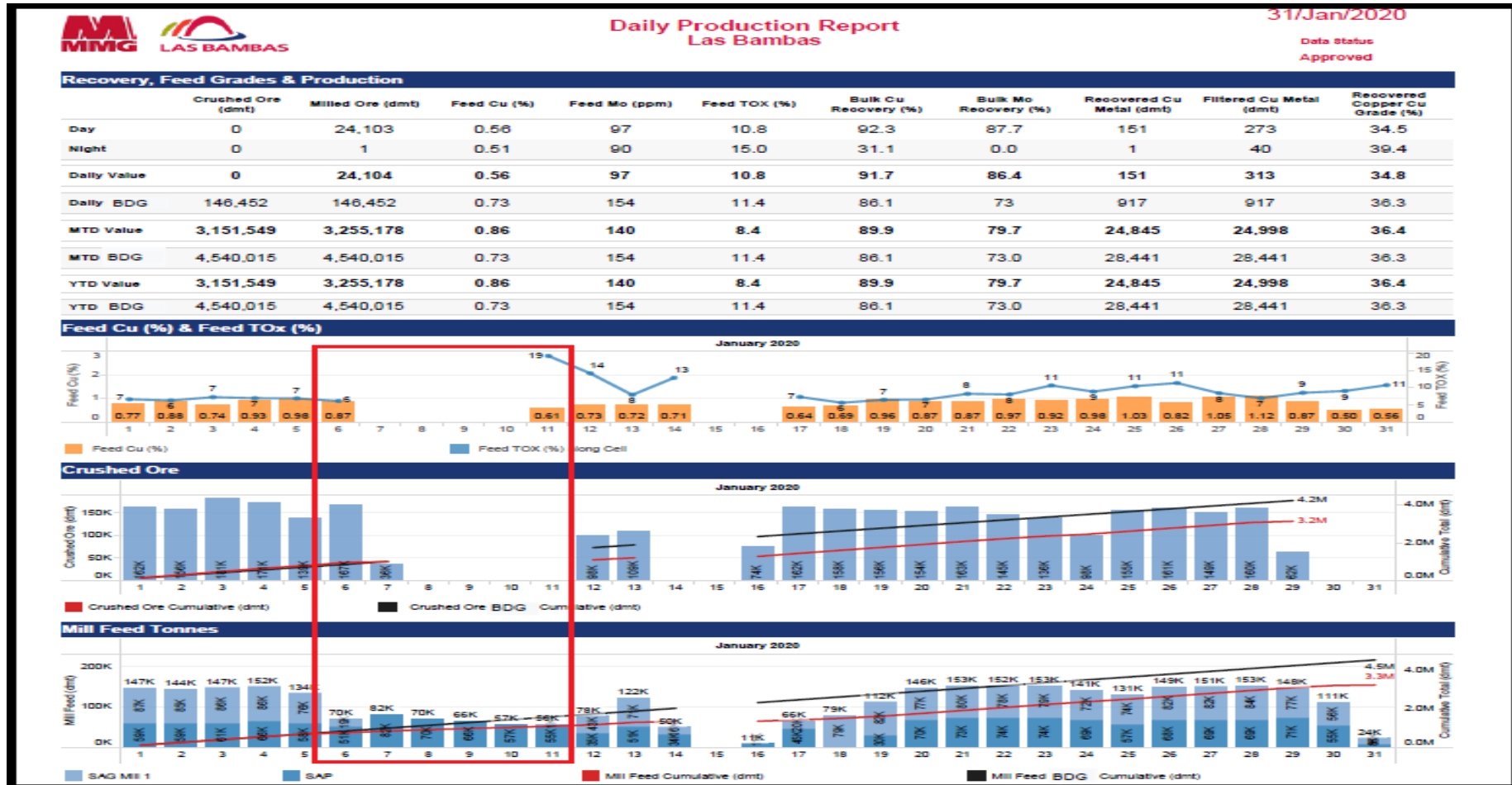
Fuente: Informe anual de planeamiento de Minera Antamina.

4.2 Contrastación de Hipótesis

El no cumplir con el mantenimiento preventivo en los PADs de un molino puede traer consecuencias catastróficas que detengan el equipo por varios días teniendo un impacto en la disponibilidad y en la producción de una planta concentradora. En la figura 43 se muestra el resultado de la producción afectada durante los días de detención del molino 310MLB001 de Minera Las Bambas.

Figura 43

Grafica de producción diaria durante el mes de enero 2020 en Minera las Bambas



Fuente: Informe de Operaciones concentradora Minera Las Bambas enero 2020

4.3 Discusión de resultados

De los resultados de producción de la planta concentradora finalmente se puede determinar que la disponibilidad de un equipo y la producción están directamente relacionados por lo tanto el control que tiene el área de Mantenimiento sobre los trabajos que programa en los equipos durante el año debe ser realizados siguiendo todas las recomendaciones de los fabricantes complementándolo con las mejores prácticas que se puede desarrollar en el área de Mantenimiento. Intervenir preventivamente los PADs de los molinos muchas veces son limitadas por las interferencias con otros trabajos que conllevan a no utilizar bien los recursos disponibles, por lo que es recomendable mejorar el diagrama Gantt para lograr optimizar recursos y lograr intervenir los PADs de los molinos.

Conclusiones

- a. El Mantenimiento Preventivo de los trunnion de los molinos deben ser incluido en todos los programas de mantenimiento periódico para estos equipos propuestos por el área de Planeamiento.
- b. La calibración de los PADs debe estar incluidos en los programas preventivos de mantenimiento con una periodicidad de 2 años o antes en caso de que el diferencial de presión dinámico sea superior al 10%, este valor es el recomendado por el fabricante del molino en este caso FLSmith.
- c. En este caso estos trabajos correctivos tuvieron un impacto de 05 días 18 hrs y 2 min en la disponibilidad del molino 310MLB001 lo que significa un aproximado del 19% de la disponibilidad mensual presupuestada para este molino.
- d. En términos de producción debido a la falla del molino 310MLB001 se dejó de procesar aproximadamente 490000Ton de mineral con una ley de Cobre de 0.86% y una recuperación de 89.9% lo que significa que se dejó de producir 3780 ton de cobre metálico lo que representa un impacto económico de 23.7M US\$ para un precio del cobre de 2.84US\$/Lb para la fecha de enero 2020.

Recomendaciones

Trabajos de Mantenimiento Preventivo y de Confiabilidad que deben ser incluidos en el programa de mantenimiento del trunnion:

- Monitorear las tendencias de presión del aceite. La presión del aceite es proporcional a la carga del molino. Un cambio en la presión del aceite puede indicar que existe un desalineamiento del molino. Las tendencias de presión deben ser revisadas y registradas frecuentemente. El análisis de aceite debe ser realizado semanalmente.
- El diferencial de presión entre la presión del PAD y la presión promedio de los PADs no debe exceder el 10 % cuando el molino esté girando y tampoco superar el 5% cuando el molino esté detenido, (valores recomendados por el fabricante del molino FLSmidth).
- Monitorear las tendencias de la temperatura del cojinete, el promedio debe ser de 45°C +/- 5°C (valor recomendado por el fabricante FLSmidth).
- Inspección visual del trunnion con el molino girando, una evidencia de una buena alineación del molino es una superficie continua húmeda y brillante mientras el trunnion gira. Verificar que el trunnion esté libre de rayaduras o desgaste.
- Monitorear y registrar el flujo del aceite en el circuito de PADs.
- El Sello de grasa del trunnion debe ser lubricado periódicamente de acuerdo con lo indicado en el manual. Realizar mediciones de la luz entre el sello y el trunnion, este debe estar entre 0.15mm a 0.30mm.
- Monitorear la vibración del cojinete de alimentación y descarga. Si se escuchan vibraciones o ruidos anormales, debe ser informado de inmediato para su inspección.
- Revisión de la cimentación y grouting de ambos cojinetes, periódicamente deben revisarse los pernos de anclaje de los cojinetes.
- Inspeccionar las mangueras hidráulicas de los PADs para detectar posibles fugas de aceite, deben ser reemplazados si fuera necesario.
- Los limpiadores del trunnion deben ser inspeccionados para asegurar que se encuentre en su posición de operación.

Referencias Bibliográficas

- Barrios M (2015) *“Optimización de los sistemas de control de un molino de bolas”*.
- Deza R (2012) *“Mantenimiento centrado en la confiabilidad para el sistema de lubricación de un molino SAG de 100,000Ton/día” UNI*.
- Fresko M (2020) *“How grinding mil design changed over the last 30 years”*.
- Ismodes F (2014) *“Diagnostico del proceso operativo minero y minería ilegal”*
- Jeswiet J y Szekeres A. (2016) *“Energy Consumption in Mining Comminution”*
- M.D.M. Neves (2014) *“Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants”*.
- Meimaris C, (2011) *“On the comparison between measured and calculated stresses in large SAG mills”*.
- Powell M y Kanchiblotla S (2020) *“Advanced Mine to Mill Optimisation”*
- Tejada W (2010) *“Análisis dinámico de Molino SAG”*.
- Wills B, (2016) *“Mineral Processing Technology”*.

Anexos

Anexo A: Matriz de consistencia

Análisis de la lubricación en los PADs y la aplicación del mantenimiento preventivo para reducir fallas en PADs de molinos de Plantas Concentradoras que permitan mejorar su disponibilidad mecánica.

Tabla 12

Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
			INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE		
¿En qué medida el análisis del Mantenimiento Preventivo en los PADs contribuye a la mejora de la Disponibilidad Mecánica en los Molinos de una Planta Concentradora?	Mejorar la disponibilidad de los Molinos de Plantas Concentradoras de Gran Minería al realizar un análisis del Mantenimiento Preventivo de los PADs de los Molinos identificando las causas de fallas catastróficas que se producen en estos sistemas.	El análisis del Mantenimiento Preventivo en los PADs de los Molinos de Plantas Concentradoras en Gran Minería contribuirá en la mejora de la Disponibilidad Mecánica de los Molinos.	V.I.: El análisis del Mantenimiento Preventivo en los PADs de los Molinos en Las Plantas Concentradoras.	V.D.: Disponibilidad Mecánica de los Molinos de la Planta Concentradora de Gran Minería.	Disponibilidad Mecánica programada para los molinos de bolas	Sistema PI SYSTEM y AMPLA mediante Grafica de datos de variables operativas del molino de bolas

Fuente: Elaboración Propia

Anexo B: Lista de abreviaturas

- **Sistema SAP:** System Applications and Products in Data Processing, es un Sistema para la gestión de datos empresariales.
- **Sistema AMPLA:** Software Interno de Minera Las Bambas para la medición, análisis e informes de pérdidas de producción debido a la utilización de los activos de la empresa.
- **Sistema RMS:** Software para la gestión de l desempeño de activos de una empresa.
- **PI Sytem:** Software para la gestión de datos operacionales en línea.
- **PAD:** almohadilla de bronce que es parte del cojinete de un molino (nombre descrito en el manual de partes del molino FLsmidth).
- **Trunnion:** Parte del molino (muñón) que se apoya en los PAD del cojinete (nombre descrito en el manual de partes del molino FLsmidth)