

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Análisis de los modos de falla de difícil de detección
causados por la afectación de las vibraciones en el
molino de la cía, minera Nexa Resources Atacocha S.
A. A. en el año 2023**

Percy Abraham Carbajal Veli

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TESIS

A : Felipe Nestor Gutarra Meza
Decano de la Facultad de Ingeniería

DE : Darwin Celin Padilla Gutierrez
Asesor de tesis

ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de tesis

FECHA : 23 de abril de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para saludarlo y en vista de haber sido designado asesor de la tesis titulada: "ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLA DE DIFÍCIL DETECCIÓN CAUSADOS POR LA AFECTACIÓN DE LAS VIBRACIONES EN EL MOLINO DE LA CÍA. MINERA NEXA RESOURCES ATACOCHA S.A.A. EN EL AÑO 2023", perteneciente al estudiante Percy Abraham Carbajal Veli, de la E.A.P. de Ingeniería Eléctrica; se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 17 % de similitud (informe adjunto) sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores (Nº de palabras excluidas: 08) SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que la tesis constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad.

Recae toda responsabilidad del contenido de la tesis sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios de legalidad, presunción de veracidad y simplicidad, expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI y en la Directiva 003-2016-R/UC.

Esperando la atención a la presente, me despido sin otro particular y sea propicia la ocasión para renovar las muestras de mi especial consideración.

Atentamente,



Asesor de tesis

DEDICATORIA

A mi familia por estar a mi lado en los momentos difíciles y por apoyarme. A mi esposa e hijos por el apoyo incondicional, los consejos y las palabras de aliento continuamente para llegar a la meta trazada.

AGRADECIMIENTOS

Agradecido a Dios por darme una familia unida, a los docentes de la universidad continental que con su paciencia, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como estudiante y profesional.

RESUMEN

Se planteó evaluar el impacto de las vibraciones en los modos de falla de difícil detección del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023, con el fin de proporcionar recomendaciones y soluciones para mejorar la detección temprana y la gestión de riesgos en el sistema de molienda. En la metodología, el estudio se plasmó desde un plano descriptivo, no experimental y cuantitativo. Asimismo, se consideró como población a seis molinos de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., 2023 y como muestra al molino de bolas N.º 02. Se concluyó que existe un impacto negativo a partir de vibraciones anormales, que generan distintos modos de falla; ello conlleva a suscitar futuros planes de detección temprana y gestiones de riesgo en el sistema de molienda de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023. Por lo que es importante realizar inspecciones constantes para lograr una mejor eficiencia en cuanto al análisis.

Palabras clave: vibraciones, modos de falla de difícil detección, molino de bolas, gestión de riesgos.

ABSTRACT

It was proposed to evaluate the impact of vibrations on failure modes that are difficult to detect in the Cía. ball mill. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., in 2023, in order to provide recommendations and solutions to improve early detection and risk management in the grinding system. In the methodology, the study was carried out from a descriptive, non-experimental and quantitative level. Six ball mills of the Company were considered as a population. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., 2023 and as an example the ball mill N.º 02. It was concluded that there is a negative impact from abnormal vibrations, which generate different failure modes; this leads to future early detection plans and risk management in the Company's grinding system. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., in 2023. In addition, it is important to carry out constant inspections to achieve better efficiency in terms of analysis.

Keywords: vibrations, hard-to-detect failure modes, ball mill, electrical parameters, risk management.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I	15
PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO.....	15
1.1 Planteamiento y formulación del problema	15
1.1.1 Planteamiento del Problema	15
1.1.2 Formulación del problema.....	18
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Justificación e importancia.....	19
1.4 Delimitación del proyecto	20
1.5 Hipótesis y descripción de variables:.....	21
1.5.1 Hipótesis general	21
1.5.2 Hipótesis específicas	21
CAPÍTULO II.....	23
MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 Antecedentes del problema	23
2.1.1 Antecedentes internacionales	23
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	26

2.2 Bases teóricas	30
2.2.1 Teorías	30
2.2.2 Variable condición de un molino	30
2.2.3 Mantenimientos ejecutados en la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A	33
2.2.4 Variable de análisis vibracional y mediciones eléctricas	40
2.3 Definición de términos básicos	50
2.3.1 Mantenimiento.....	50
2.3.2 Voltaje	50
2.3.3 Amperaje	50
2.3.4 Molino de Bolas	51
2.3.5 Motor de inducción trifásico	51
2.3.6 HP (horsepower).....	51
2.3.7 Envolvente	52
2.3.8 Temperatura.....	52
2.3.9 Corriente	52
CAPÍTULO III	53
METODOLOGÍA.....	53
3.1 Tipo de investigación	53
3.2 Nivel de investigación.....	53
3.3 Método de investigación	53
3.4 Diseño de la investigación	54
3.5 Población y muestra	54
3.5.1 Población	54
3.5.2 Muestra	55
3.6 Técnicas de recolección de datos	55
3.7 Instrumentos.....	56

3.8 Procedimiento de recopilación de datos.....	56
3.9 Procedimiento de análisis de resultados.....	57
CAPÍTULO IV.....	58
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	58
4.2 Análisis de información de vibraciones.....	62
4.3 Discusiones de resultados.....	68
CONCLUSIONES.....	72
RECOMENDACIONES.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Operacionalización de variables.....	22
Tabla 2.	Corriente de Molino N.º 2.....	58
Tabla 3.	Voltaje de Molino N.º 2.....	59
Tabla 4.	Envolvente de Molino N.º 2.....	61
Tabla 5.	Clasificación de medición de aceleración envuelta.....	61
Tabla 6.	Niveles máximos de vibración.....	62
Tabla 7.	Vibración lado ventilador de Molino N.º 2.....	63
Tabla 8.	Vibración lado acople de Molino N.º 2.....	64
Tabla 9.	Temperatura lado izquierdo de Molino N.º 2.....	66
Tabla 10.	Temperatura lado derecho.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Placa de identificación de un motor eléctrico.	33
Figura 2. Analizador de la condición de la máquina SKF	34
Figura 3. Ilustración de la vibración: configuración de onda sinusoidal. Tomada de «Introducción al Análisis de Vibraciones», por White (1).	42
Figura 4. Representación de las frecuencias presentes en una onda sinusoidal. Tomada de «Introducción al Análisis de Vibraciones», por White (1).	44
Figura 5. Representación visual de la velocidad de un objeto en vibración. Tomada de «Introducción al Análisis de Vibraciones», por White (1).	45
Figura 6. Representación visual número 6 que ilustra la aceleración de un objeto en vibración. Tomada de «Introducción al Análisis de Vibraciones», por White (1). 45	
Figura 7. Análisis de Vibraciones. Tomada de «Diseño de un Sistema de Monitoreo de Vibraciones Mecánicas en Generadores Hidroeléctricos de Media Potencia», por Maigua et al. (33).	47
Figura 8. Motor del molino de bolas N.º 2.	55
Figura 9. Recolección de datos: vibraciones y mediciones eléctricas de las maquinarias. Usando el medidor de vibraciones tipo pluma CMAS 100 SKF.	57
Figura 10. Gráfico de líneas de tendencia de corriente de Molino N.º 2.	58
Figura 11. Tendencia de voltaje de Molino N.º 2.	60
Figura 12. Tendencia de embolvente de Molino N.º 2.	61
Figura 13. Tendencia de vibración lado ventilador de Molino N.º 2.	63
Figura 14. Tendencia de vibración lado acople de Molino N.º 2.	65

Figura 15.Tendencia de temperatura lado izquierdo de Molino N.º 2.....	66
Figura 16.Tendencia de temperatura lado derecho	67

INTRODUCCIÓN

Dentro de la experiencia del tesista, en el campo del ingeniero eléctrico dentro de la Compañía Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A, se ha desarrollado un profundo conocimiento sobre los efectos de la vibración en sistemas eléctricos industriales y su impacto en el diagnóstico de fallas de difícil detección. En este informe, se destacará la relevancia de este conocimiento específico para garantizar la seguridad en el funcionamiento de la maquinaria eléctrica, la detección precoz de problemas eléctricos, la reducción de pérdidas económicas, la optimización de recursos, el ahorro de tiempo y costos, así como la mejora de la eficiencia operativa en la planta minera. Este enfoque preventivo es esencial para mantener la competitividad y el éxito a largo plazo de la compañía en un entorno industrial altamente desafiante, enfocado en la ingeniería eléctrica.

La empresa viene presentando problemas en el sistema eléctrico, dado que se producen constantes paradas imprevistas e interrupciones eléctricas en el circuito de molienda, causados por el desbalanceo o las vibraciones en los motores de los molinos.

Asimismo, todos los motores eléctricos vibran debido al movimiento de rotación de sus ejes y las tolerancias entre sus componentes. Estas vibraciones deben ser de una magnitud aceptable y constante, pero la magnitud de las vibraciones aumenta con el tiempo debido a la degradación de estos componentes, y la máquina debe reemplazarse antes de que los componentes fallen por completo, lo que resulta en la parada total o parcial de la máquina (1). Debido a que cada parte de la máquina vibra a una frecuencia específica, esta vibración de la máquina se puede diagnosticar para identificar los componentes dañados, analizar la magnitud de la vibración y predecir si un componente está en riesgo de falla catastrófica.

Entre las fallas de mayor detección observados en el sistema eléctrico, debido a las magnitudes inestables de las vibraciones de un motor están las siguientes: el desgaste prematuro de componentes mecánicos, generación de armónicos, desalineación de

acoplamientos, aumento de pérdidas de motor, desequilibrio en la distribución de cargas y mayor tensión y esfuerzo en conexiones eléctricas.

Este estudio se justifica a partir de la incertidumbre de conocer el impacto de las vibraciones y su relación con los modos de falla de difícil detección del molino de bolas la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A.; en otra palabras, se analizará en qué medida los parámetros eléctricos como corriente, voltaje y consumo de energía varían respecto a las vibraciones del motor del molino. A partir de ello, se realizó las recomendaciones y soluciones futuras para mejorar la detección temprana y la gestión de riesgos en el sistema de molienda, para evitar interrupciones en la producción y reducir los costos asociados con reparaciones y mantenimiento correctivo.

La investigación en el campo metodológico se realizó desde una perspectiva de tipo aplicada, nivel descriptivo y diseño transversal no experimental en una muestra poblacional de un molino de bolas. Se recolectó información de las fuentes como informes sobre la base de los datos sobre el estado de disponibilidad de los molinos

Por ello, esta tesis se desarrollado en capítulos. En el primero, el lector podrá encontrar el planteamiento de investigación, donde se explica el problema desde una perspectiva internacional y nacional; asimismo se formulan los problemas a nivel general y específico; seguido se muestran los objetivos generales y específicos. Además de argumentos. También, se incluyen hipótesis general y específicas, que serán el fundamento para describir y operacionalizar las variables.

A su vez, el capítulo II presenta un marco teórico que primero describe el contexto a nivel nacional e internacional; luego encuentra una base teórica para apoyar y sustentar las variables; también se identifica los términos clave y se los define por separado. Mientras que el capítulo III es el plan metodológico, incluyendo método, tipo, alcance, diseño y enfoque

de la investigación; además se describe el conjunto, la muestra y sus características; así mismo se presentan los métodos de recolección de datos, los procedimientos de investigación y el aspecto ético.

A su vez, el capítulo IV presenta los resultados a nivel descriptivo e inferencial, y la prueba de hipótesis a nivel general y específico, y además proporciona una discusión de los resultados. Para culminar, la última parte del trabajo de investigación contiene conclusiones, recomendaciones y anexos de todo proceso de investigación y reportes de inspecciones realizadas al recolectar datos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO

1.1 Planteamiento y Formulación del Problema

1.1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, el término de *mantenimiento* tuvo mucha importancia durante el último siglo; la razón principal es la creciente demanda de maquinaria, equipos y herramientas. Las actividades de mantenimiento las realizaban los mismos trabajadores u operarios que estuvieron a cargo de los equipos, quienes solo contaban con experiencia, mas no con el conocimiento especializado; aquello lo nombraron mantenimiento correctivo. Luego, con la llegada de otros tipos de mantenimiento se transformó radicalmente la eficiencia de los procesos en la industria, contaron con manuales, guías, inspecciones, protocolos de seguridad, entre otros. Así también, el personal estuvo más calificado y especializado para el óptimo funcionamiento de equipos industriales, garantizando el mejor uso de los recursos y la reducción de paradas en la operación (2). En definitiva, desde la construcción de herramientas complejas hasta la automatización de procesos, siempre existe la necesidad de mantenimiento en un esfuerzo por garantizar que los equipos funcionen siempre con una eficiencia del 100 %.

A nivel nacional, el desempeño de las máquinas a menudo se caracteriza por la vibración causada por las fuerzas que actúan sobre ellas y sus propiedades físicas. Estas intensidades varían según los requisitos de trabajo de la máquina y el nivel de carga, pero durante la resonancia las vibraciones pueden alcanzar niveles excesivos con una fuerza mucho mayor que cuando la máquina está en su estado normal. Asimismo, la fuerza de vibración se suma a las fuerzas ejercidas por la máquina durante el funcionamiento; este fenómeno puede debilitar sus cimientos y provocar su colapso, lo que representa un alto

riesgo para los operadores y trabajadores en el área de trabajo (3). En suma, el análisis de vibraciones durante las inspecciones es muy importante, ya que permite la detección temprana de fallas.

Por lo tanto, la mejor solución es encontrar un estado en el que la máquina llega a encontrarse en resonancia, para ello se pueden medir y estudiar las vibraciones con diferentes parámetros que permitan reconocer la situación. Dependiendo de los resultados, se pueden planificar algunas acciones correctivas o se pueden documentar las condiciones físicas a evitar que el equipo no vuelva a presentarse en mantenimiento (4). En concreto, toda máquina presenta vibraciones en diferentes intensidades el cual, si sobrepasa su intensidad normal, puede producir problemas eléctricos junto con la degradación de componentes. Para ello, es necesario la inspección constante del funcionamiento y realizar acciones correctivas a tiempo.

El mantenimiento incluye las actividades que se deben realizar y están definidas en el plan anual de desmantelamiento de la instalación, en el que se especifican los equipos, las áreas y la disponibilidad de dichos equipos durante la fase de beneficio. Las actividades de mantenimiento incluyen lo siguiente: reparar, mantener, preservar, mejorar y proyectar; buscando maximizar el rendimiento de los equipos que posee la compañía (5). En otras palabras, las actividades de manteniendo permiten mantener el equipo en óptimas condiciones evitando fallas de funcionamiento.

Las técnicas de mantenimiento que más emplean las empresas en sus planes son las siguientes: termografía, tribología y el análisis vibracional. Asimismo, el objetivo principal del área de mantenimiento en la planta de procesos es garantizar la disponibilidad operativa de los equipos durante la operación del proceso productivo. La subcontratación a una compañía externa para llevar a cabo el análisis de vibraciones implica un contrato por un tiempo determinado y revisiones periódicas. Al obtener el informe técnico de esta evaluación

externa, es factible examinar detalles como la identificación y denominación del equipo, el mapeo de seguimiento del análisis, los valores medidos en cada punto de control y el diagnóstico más reciente del nivel de gravedad de cada máquina (4). Un análisis de fallas adecuado en el proceso de mantenimiento contribuye a mejorar la eficiencia operativa de los equipos de la planta y los procesos de producción. Esto se traduce en un aumento de los ingresos, una reducción de los costos operativos y una mejora en la calidad de los bienes producidos.

Los molinos de bolas juegan un papel vital en el proceso de molienda de minerales y son los encargados de disminuir el tamaño de partícula con el fin de obtener el producto final deseado. Sin embargo, los molinos de bolas también son propensos a sufrir daños y fallas, lo que puede afectar seriamente la disponibilidad y eficiencia de la planta (6). En la industria minera, la eficiencia de los equipos son factores clave para garantizar una producción continua y rentable.

El cuidado y mantenimiento del molino de bolas es obligatorio para el operario; puesto que tomar precaución de conservación racional es el método principal para prolongar la vida productiva del molino de bolas, desarrollar la capacidad de producción y reducir la tasa de fallas (7).

En la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., se realizan paradas para redactar un informe de detalles, por cada falla; de acuerdo con la inspección predictiva del 2022 sobre datos de vibraciones, se evidenciaron fallas en categoría de peligro, además de paradas eléctricas repentinas. Es por ello que surge la interrogante de conocer a profundidad la relación de las vibraciones con los modos de fallas eléctricos de difícil detección en el motor de los molinos de bolas de la empresa minera.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Formulación del problema general

¿Cómo impactan las vibraciones con los modos de falla de difícil detección del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023?

1.1.2.2 Formulación de los problemas específicos

- ¿Identificar las vibraciones y resonancias anormales, que puedan indicar posibles fallas o desgaste en sus componentes eléctricos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023?
- ¿Afectan las vibraciones en la medición de parámetros eléctricos, como corriente, voltaje, en el sistema eléctrico general y en los componentes específicos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de las vibraciones en los modos de falla de difícil detección del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.

1.2.2 Objetivos específicos

- Se identifica las vibraciones y resonancias anormales, que puedan indicar posibles fallas o desgaste en sus componentes de difícil detección del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.
- Determinar si las vibraciones afectan la medición de parámetros eléctricos, como corriente, voltaje o consumo de energía, tanto en el sistema eléctrico general como en los componentes específicos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.

1.3 Justificación e Importancia

La investigación surge debido a la incertidumbre acerca del efecto de las vibraciones en los modos de falla difíciles de detectar en el molino de bolas de la compañía Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., con el objetivo de ofrecer recomendaciones y soluciones para mejorar la detección temprana y la gestión de riesgos en el sistema de molienda. Según Guerra y Montes (4), un adecuado análisis de las fallas en la evaluación de los impactos de las vibraciones contribuye a aumentar la eficiencia operativa de los equipos de la planta y los procesos de producción, lo cual resulta en un aumento de los ingresos, una disminución de los costos operativos y una mejora en la calidad de los productos fabricados.

Además, tomar las debidas precauciones de conservación racional es el método principal para prolongar la vida productiva del molino de bolas, desarrollar la capacidad de producción y reducir la tasa de fallas.

A nivel práctico, la evaluación del impacto de las vibraciones en el molino de bolas y su relación con los modos de falla de difícil detección es de suma importancia desde una perspectiva práctica. Dado que las vibraciones pueden ser indicativas de posibles problemas o desgastes en los componentes del molino, lo cual puede llevar a fallas graves y elevados costos en el sistema de molienda. Además, la identificación precisa de los modos de falla relacionados con las vibraciones será utilizada de referencia para implementar estrategias de mantenimiento preventivo más efectivas, que aumenta así la confiabilidad y disponibilidad del molino.

Desde una perspectiva económica, es fundamental considerar el impacto financiero que pueden tener las fallas no detectadas y los problemas causados por las vibraciones en el molino. Las interrupciones en la producción debido a reparaciones no planificadas pueden generar pérdidas significativas en términos de tiempo de inactividad, disminución en la

producción de mineral y costos adicionales asociados con la contratación de servicios de emergencia. Además, las fallas graves en los componentes del molino pueden requerir inversiones sustanciales en reparaciones o incluso en la adquisición de nuevos equipos, lo que representa una carga financiera adicional para la empresa minera. Mediante el estudio y comprensión de las vibraciones y su relación con las formas en que puede ocurrir una falla, se podrán implementar estrategias de mantenimiento predictivo y preventivo más eficientes, lo que reducirá los costos asociados con reparaciones no planificadas, extenderá la vida útil de los equipos y mejorará la eficiencia operativa en términos económicos. En resumen, la justificación económica radica en la optimización de los recursos financieros y la maximización de los beneficios a largo plazo para la compañía minera.

Por último, se puede inferir que tiene justificación teórica, ya que aporta aspectos recientes acerca de los distintos modos de falla de un sistema eléctrico, que se relacionan con magnitudes inestables de vibraciones del motor de un molino de bolas, además los resultados de este estudio ayudarán a otros investigadores a realizar indagaciones en situaciones con características y equipos comunes, también animarán a continuar estudiando las mismas variables a un nivel aplicado.

1.4 Delimitación del Proyecto

El estudio se basa en recaudar datos de las vibraciones y parámetros eléctricos como corriente, voltaje o consumo de energía, tanto en el sistema eléctrico general como en los componentes específicos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A. Asimismo, los datos serán recolectados en un lapso de tres meses aproximadamente, de manera semanal y enfocada a los puntos críticos del motor de uno de los seis molinos de bolas con los que cuenta la compañía.

1.5 Hipótesis y Descripción de Variables

1.5.1 Hipótesis general

Se plantea que la afectación de las vibraciones está vinculada con la aparición de modos de falla de difícil detección en el molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023

1.5.2 Hipótesis específicas

- Se plantea que, mediante la implementación de técnicas de monitoreo y análisis de vibraciones, es posible identificar y evaluar de manera efectiva las vibraciones y resonancias anormales, lo cual permitirá detectar posibles fallas o desgaste en sus componentes de difícil detección en el molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.
- Se postula que las vibraciones afectan la medición de parámetros eléctricos como corriente, voltaje o consumo de energía, tanto en el sistema eléctrico general como en los componentes específicos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones
Variable dependiente: modos de falla eléctrico de difícil detección del molino de bolas	Las fallas son una serie de eventos eléctricos en el que algún componente o pieza del molino no funciona correctamente, de manera parcial o total, además se pueden dar en diferentes niveles de gravedad (8).	Los modos de fallas más comunes en los molinos son las siguientes: anomalías en el motor eléctrico, cambios de voltaje, problemas en el sistema de control, fallas en el sistema de arranque amperaje, problemas en el sistema de alimentación eléctrica y desgaste del sistema eléctrico (10).	Anomalías en el motor eléctrico Cambios de voltaje Problemas en el sistema de control Fallas en el sistema de arranque Modificación de amperaje Problemas en el sistema de alimentación eléctrica Desgaste del sistema eléctrico
Variable independiente: vibraciones en el molino de bolas	La vibración es un movimiento oscilante de pequeña amplitud. Cada cuerpo tiene una señal vibratoria que refleja todas sus características. A partir de esto, la máquina muestra su firma vibratoria, que contiene información sobre cada uno de sus componentes. En consecuencia, la señal de vibración de la máquina representa la suma de los vectores de vibración de cada uno de sus componentes. En suma, la vibración es la oscilación de cualquier objeto en relación con un punto de referencia (1).	La vibración es el movimiento de una máquina o sus componentes hacia adelante y hacia atrás desde un estado estable en cualquier dirección del espacio. La vibración a menudo se origina por problemas mecánicos, como el desequilibrio en los elementos giratorios, la desalineación del acoplamiento y el desgaste o daño en los engranajes, cojinetes desgastados, problemas aerodinámicos o hidráulicos y eléctricos (9).	Parámetros vibracionales Mediciones eléctricas

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del Problema

2.1.1 Antecedentes internacionales

Hernández et al. (3) realizaron un estudio para analizar el valor RMS (Root Mean Square Amplitude). Se llevaron a cabo mediciones de la velocidad de vibración global en cuatro puntos diferentes sobre una superficie irregular y flexible. Posteriormente, se realizó una comparación con los datos obtenidos de un inserto plano y sólido utilizado como referencia. Asimismo, se llevaron a cabo todas estas mediciones en el plano vertical radial del cojinete lateral libre del motor, que estaba ubicado dentro de un módulo de prueba operando en condiciones estables. La normalidad de los datos recolectados se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, y para comparar las distintas muestras se utilizó la prueba estadística T de Student. Los resultados señalaron que las mediciones en superficies irregulares y no rígidas difieren de aquellas obtenidas en los insertos, lo que sugiere firmemente la necesidad de realizar pruebas minuciosas y exhaustivas al conectar sensores de análisis de vibraciones a superficies de máquinas. Estos hallazgos servirán como base para la detección oportuna de fallas eléctricas que en su mayoría, causan paradas no deseadas en la actividad de la empresa.

Por su parte, de acuerdo con Valenzuela (10), la electricidad es una materia prima esencial en la producción de cobre. En Chile, donde la extracción de este mineral tiene una significativa presencia gran parte del producto nacional bruto, las medidas encaminadas a aumentar la eficiencia del proceso minero, especialmente las relacionadas con la molienda del mineral, son importantes, sobre todo a medida que el precio de venta del cobre cae y a medida que las industrias buscan formas de aumentar la eficiencia y reducir los costos. En

este contexto, el presente estudio lleva a cabo un análisis estadístico de las variables más relevantes en el proceso de molienda de mineral, que incluye chancado, molienda semiautógena y transporte mediante cinta transportadora.

El objetivo principal es proponer medidas de eficiencia energética fundamentadas en el análisis de datos. Con este fin, se utilizaron datos recopilados durante un periodo de tres años (2015, 2016 y 2017), que incluyen información sobre la materia prima procesada, el consumo de energía y el tamaño de partícula del molino SAG. Estos datos se procesaron y analizaron de manera diaria para identificar patrones que permitieran identificar las áreas donde se podrían implementar estrategias eficaces para optimizar la eficiencia energética y el procesamiento de minerales. Uno de los objetivos fundamentales del análisis fue calcular el indicador clave de rendimiento (KPI) de eficiencia energética, expresado en kilovatios-hora por tonelada procesada (kWh/TPD) en el proceso en cuestión. Como resultado de una evaluación del potencial de la planta SAG para disminuir el gasto energético y potenciar la eficiencia productiva, se llegó a la conclusión de que la mejora en el tamaño de las partículas en la alimentación del molino SAG la aplicación de estas medidas tiene el potencial de aumentar la eficiencia del proceso y generar significativos beneficios económicos anuales acumulativos. Esta evidencia respalda la justificación para implementar las propuestas presentadas en este informe.

Mientras que de acuerdo con Figueroa (11), GPT-el Departamento de Mantenimiento de Equipos Mineros de la Empresa Minera Cerro Negro llevó a cabo un estudio centrado en el mantenimiento de sus equipos utilizados en la minería. Este departamento se encarga tanto del mantenimiento preventivo como del correctivo de dichos equipos. Asimismo, en este estudio, se evaluaron los equipos según diversos criterios, tales como el tiempo de operación, la frecuencia de fallas (tanto eléctricas como mecánicas), el intervalo entre fallos, la disponibilidad y los costos de mantenimiento. Esta evaluación, junto con la opinión de

expertos en mantenimiento, operaciones y gestión del área, resultó en la elección de equipos clave para las secciones de perforación y carga. Entre ellos, se destacaron el equipo de perforación Junjin 1 y la excavadora Komatsu PC800. Además, para este análisis, se utilizó el método RCM II, que es eficaz en la identificación de fallos y en la planificación de mantenimiento a intervalos específicos. A partir de esto, se desarrolló un plan de mantenimiento y se realizó una comparación de los costos de mantenimiento reales con los costos proyectados al implementar el método de confiabilidad. Los resultados mostraron una reducción del 59 % en los costos de mantenimiento correctivo. Además, se propusieron varias recomendaciones para optimizar la gestión de procesos en el Departamento de Mantenimiento de Equipos Mineros de la Empresa Minera Cerro Negro.

A su vez, Zamora (12), llevó a cabo una investigación con el propósito de crear un plan de mantenimiento para el Molino de Bolas “G” de la Compañía Minera Cerro Negro S.A. Este molino, que ha estado funcionando durante seis meses, se sitúa como el componente principal en el área de molienda y es responsable de procesar aproximadamente el 75 % del mineral sulfurado. La falta de un plan de mantenimiento y repuestos adecuados ha resultado en un elevado número de fallos, especialmente en el sistema eléctrico, que causa paradas no programadas, lo que representa un asunto crítico tanto operativa como financieramente. Además, la compañía carece de registros, manuales o recomendaciones del fabricante para los equipos. En cuanto a la metodología, se diseñó un plan de mantenimiento que comenzó con la recopilación de información, seguida por un análisis detallado para identificar las fallas y los componentes críticos en el sistema eléctrico. Como resultado, se estimó que la implementación de las estrategias y políticas de mantenimiento propuestas en el plan podría generar ahorros del 52 %. Sin embargo, es importante destacar que estos beneficios se alcanzarían a mediano y largo plazo, ya que la aplicación efectiva de la estrategia de mantenimiento y las revisiones eléctricas requieren de la formación continua

del personal operativo de la empresa y de un esfuerzo sostenido para mantener los equipos en condiciones óptimas.

Finalmente, Cadmen (13) analizó que la mayoría de los procesos industriales pueden fallar. Las consecuencias pueden abarcar desde pérdidas económicas hasta daños irreparables e incluso la pérdida de vidas humanas. Por esta razón, la industria busca actualmente sistemas expertos que sean seguros, confiables y capaces de detectar y controlar errores, permitiendo el monitoreo y diagnóstico de fallas. En este contexto, el objetivo de esta investigación es desarrollar un sistema de detección y diagnóstico de múltiples fallas utilizando la técnica de análisis de componentes principales (PCA) y aplicar lógica difusa para identificar fallas en el sistema eléctrico, alimentación y otros elementos del sistema de molienda. Para la simulación se usará metódicamente un modelo matemático del proceso de molienda basado en el balance de flujo y la distribución del tamaño de las partículas. La validación del sistema se realizará utilizando una base de datos de historiadores de variables de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) de la cadena de molienda. En resumen, hemos observado que las técnicas de análisis de componentes principales tienen la capacidad de disminuir el número de variables en un conjunto de datos mientras se preserva la variabilidad sistemática. Además, se debe disponer de un sistema experto para detectar defectos en los equipos industriales, especialmente en los procesos de molienda y lograr evitar la degradación de las conexiones eléctricas del equipo.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Rodríguez y Gavidia (14) llevaron a cabo análisis en los molinos desmeduladores de bagazo en una empresa dedicada a la fabricación de papel. El objetivo era asegurar el funcionamiento óptimo de los equipos y mejorar su rendimiento mediante la implementación de un plan de mantenimiento centrado en la evaluación de posibles fallas tanto eléctricas como mecánicas. Metodológicamente, el estudio es aplicado-preexperimental, y se inició el

estudio evaluando el desempeño del mantenimiento rutinario, siendo la disponibilidad inicial de los equipos del 89,65 %, 88,94 % y 90,87 %, respectivamente. Además, las confiabilidades 1, 2 y 3 se sitúan en 90.19 %, 89.89 % y 91.20 %, respectivamente. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis de criticidad y un análisis de modo y efecto de falla (AMEF) para determinar la categoría de falla crítica mediante el número de prioridad de riesgo (NPR). Asimismo, al implementar un plan de mantenimiento preventivo basado en análisis causa raíz (ACR) de componentes eléctricos y mecánicos, las tasas de disponibilidad actuales de las turbinas 1, 2 y 3 son 95.81 %, 95.54 % y 96.40 %, respectivamente, y la confiabilidad es 90.19 %, 90.00 % y 91.36 %, que soluciona el problema de las turbinas desequilibradas en funcionamiento. Finalmente, el caso para explorar los costos y beneficios de implementar el mantenimiento basado en el análisis de fallas eléctricas y mecánicas del equipo; el retorno de la inversión está determinado por el logro del valor rentable.

Por su parte, López y López (15) desarrollaron una investigación enfocada en implementar un mecanismo de protección automática para los molinos de caña, fundamentada en la evaluación de las vibraciones, con el fin de mejorar la eficiencia operativa de los componentes del molino y prolongar su vida útil mediante el uso de herramientas de análisis y simulación, como SolidWorks. El estudio comenzó identificando los componentes clave de un molino de caña, considerando los materiales utilizados, las dimensiones y los parámetros relevantes. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de vibraciones para determinar cuáles de estos componentes son más susceptibles a estos efectos. Se encontró que las piezas de mayor soporte y dimensiones adecuadas tienden a sufrir menos vibraciones, lo que contribuye a un funcionamiento eficiente y a una mayor durabilidad del sistema eléctrico. El sistema de protección automático diseñado está orientado a controlar de manera más eficaz el equipo desde el punto de vista de seguridad.

No solo ayuda a prolongar la vida útil del equipo, sino que también asegura una calidad de energía eléctrica mejorada, cumpliendo con todos los estándares de seguridad y calidad establecidos. El estudio concluyó que la implementación de este sistema resultaría en beneficios económicos, un retorno de inversión favorable y un valor añadido significativo para los interesados.

Mientras que Narvaez (16), desarrolló un estudio en la concentradora de la Empresa Minera El Brocal, filial de Cía. Minera Buenaventura, localizada en la ciudad de Colquicirca, Tinjahuarco. La instalación consta de varios equipos importantes, uno de los cuales es el molino de bolas NCP de 20' x 30', que consta de sistemas de transmisión de micro movimiento eléctrico, de carga y descarga, de lubricación y de transmisión auxiliar. Asimismo, los problemas involucraban tiempo de inactividad no programado por motivos eléctricos, que se registraba hasta 27 horas antes de que la máquina se reiniciara. Además, en el aspecto metodológico, es un estudio de nivel básico y descriptivo, ya que se identificaron fallas repetidas en los sistemas que conforman la planta, como objetivo se estableció analizar las fallas y proponer un programa de mantenimiento preventivo para un molino de 20'x30'. El diseño es claro y descriptivo, de manera que la sugerencia para el programa de mantenimiento preventivo del molino de bolas, basado en el método de análisis de modos y efectos de fallas (FMEA), proporciona información sobre los modos de fallo, causas y efectos, y por ende las acciones a tomar. En conclusión, este programa contribuirá a reducir las paradas no planificadas a partir del Mediano plazo.

Por su parte, Valerin (17) realizó una investigación con el fin de evaluar el consumo de energía eléctrica del molino don Julio en Lambayeque durante el 2018, enfocándose en la eficiencia energética en el contexto de una política de ahorro de energía. El objetivo fue disminuir la cantidad de energía requerida para las operaciones de carga y procesamiento de arroz, lo que impacta directamente en la eficiencia general de la planta. El análisis comenzó

con una revisión del consumo eléctrico actual, integrando datos históricos de consumo y producción de energía para identificar los períodos de mayor consumo, considerando el tamaño y las horas de funcionamiento de los equipos. Se observó que con una carga menor a la completa, la eficiencia tiende a disminuir. Para determinar los picos de consumo, se realizaron mediciones eléctricas y se analizaron los parámetros operativos, comparándolos con las especificaciones del fabricante. Utilizando teorías científicas, se examinó la variabilidad de cada parámetro y su relevancia. Al identificar discrepancias entre los valores medidos y los nominales, se sugirieron cambios o reemplazos en los mecanismos para lograr un consumo eléctrico más eficiente, lo que a su vez podría reducir los costos de producción. Finalmente, se efectuó un análisis económico de las propuestas empleando indicadores tales como la tasa interna de retorno, el valor presente neto y la relación costo-beneficio para determinar la viabilidad económica de las mejoras sugeridas.

Finalmente, Andrade y Ramos (18) investigaron la introducción de un programa de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad diseñado para la línea de chancado primario en una empresa minera implica la recopilación y análisis de datos históricos vinculados a fallas y actividades de mantenimiento. Esta estrategia buscó examinar el estado actual de los equipos mediante la evaluación de información recopilada a lo largo del tiempo. Estos datos fueron recopilados en una mina a cielo abierto con una capacidad de procesamiento de mineral de 117,200 toneladas diarias. En resumen, la aplicación de un enfoque de mantenimiento orientado a la confiabilidad y el correcto funcionamiento del sistema eléctrico resulta en una reducción de las paradas no planificadas del equipo. La fundamentación de esta conclusión se apoya en los resultados derivados de la simulación de la condición mejorada en la línea de chancado primario, evidenciando una reducción en el tiempo necesario para ejecutar las labores de mantenimiento y una detección eficaz de las fallas eléctricas en el momento oportuno.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Teorías

A fines de la década de 1950, el mantenimiento se basaba realmente en acciones correctivas, es decir, solo intervención en caso de accidentes; en la década de 1970, el aumento de la competitividad creó la necesidad de extender la vida útil de los activos al tiempo que aumentaba la disponibilidad y la confiabilidad a un costo mínimo, lo que llevó al mantenimiento preventivo. Al mismo tiempo, se desarrollaron técnicas de mantenimiento organizacional, cuyo objetivo básico es lograr la ausencia de defectos durante la operación, conocido como mantenimiento productivo total (TPM). En la década de 1980 se desarrollaron métodos únicamente para la intervención de equipos e instalaciones cuando fuera necesario; las inspecciones regulares son realizadas por técnicos calificados con intervenciones periódicas basadas en el equipo encontrado en cada inspección, esto ha llevado al desarrollo del mantenimiento predictivo donde las inspecciones se realizan en forma de detección y monitoreo sin intervención humana (2).

2.2.2 Variable condición de un molino

Molino de bolas

Los molinos de bolas han sido empleados a lo largo de numerosos años en instalaciones de procesamiento de minerales, tanto metálicos como no metálicos, siendo más frecuentes en las primeras. El propósito principal es reducir el tamaño a una dimensión adecuada para facilitar los procesos de concentración (flotación, separación gravimétrica o magnética) y/o lixiviación (cianuración de minerales de oro) (19).

La entrada al molino de bolas, que representa el último eslabón en la cadena de molienda, varía en tamaño en función del tamaño del producto final molido y de las necesidades energéticas del molino. Es crucial que esta alimentación mantenga un tamaño

equilibrado ni demasiado grueso ni excesivamente fino, con el fin de asegurar que la calidad del producto final no se vea comprometida y la eficiencia de los procesos subsecuentes. La molienda se lleva a cabo con la adición de agua y productos químicos como la cal para regular el pH, junto con inhibidores como el sulfato de zinc y el cianuro, así como otros agentes específicos para el tipo de mineral procesado (19). En resumen, la dureza y el tamaño del material molido son factores críticos en la operación de los molinos, ya que materiales más duros y de mayor tamaño requieren más esfuerzo, tiempo y energía, lo que incrementa los costos operativos.

Los molinos de bolas están equipados con una gran cantidad de bolas de acero, que representan del 30 % al 45 % del volumen interno del molino. La carga de bolas puede consistir en bolas del mismo diámetro o de diferentes tamaños para obtener un producto final adecuado (19). Este equipo, aparte de reducir de tamaño, tiende a ser muy resistente por el tipo de trabajo que realizan, pero son propensos a sufrir daños, por ello, es muy común que reciban mantenimiento constante.

El cuidado y mantenimiento del molino de bolas es obligatorio para el operador; el plan de medidas formuladas para un mantenimiento razonable es el principal método para ampliar la vida útil del molino de bolas, incrementar la capacidad de producción, así como disminuir la tasa de fallas, y además es un método directo (20).

En los motores eléctricos, los inconvenientes comúnmente surgen en el ámbito eléctrico causados por uno de los siguientes factores, acorde con WEG (20):

- Diferencia no uniforme en la separación entre el rotor y el estator.
- Las barras del rotor están desprendidas o dañadas.
- Mala calidad de la energía: desequilibrio de tensión, armónicos, otros.
- Invertir el error.

- Sobrecarga.
- Demasiados arranques y paradas.
- Desafíos con el aislamiento.

Si se detecta un problema eléctrico en el motor, se recomiendan las acciones a seguir variarán según los síntomas, acorde con WEG (20):

- Realizar análisis de calidad de energía de los sistemas de control y potencia.
- Realice un estudio del entrehierro y evalúe la causa (rotor/estator).
- Pruebas eléctricas de motores (calidad de aislamiento).
- Evaluar la integridad de las juntas de la barra del rotor.
- Analizar el número de arranques consecutivos.

La placa de identificación del motor

La placa de identificación proporciona información valiosa, y comprenderla es esencial; los datos en la placa de especificaciones son indicadores clave que siempre deben tenerse en cuenta para garantizar un funcionamiento fiable y eficiente, inspecciones eficaces y Un mantenimiento apropiado. Operar un motor más allá de sus límites de diseño reducirá significativamente su vida útil y eficiencia; los operadores, inspectores y personal de mantenimiento deben comprender todos estos parámetros y relacionarlos con la condición operativa y funcional del equipo (21). En resumen, se debe ubicar la placa de identificación del motor, protegerla y mantenerla en buenas condiciones; evitando la luz solar, la contaminación ambiental y la humedad, porque pueden afectar el estado y la legibilidad de las planchas de impresión y generar lecturas erróneas (figura 1).



Figura 1. Placa de identificación de un motor eléctrico.

Mantenimiento

El mantenimiento implica monitorear y probar los puntos más débiles durante un período de tiempo predeterminado, lo que no se realiza puede conducir a fallas. También, puede entenderse como el apoyo a una variedad de actividades de mantenimiento, políticas y decisiones generales relacionadas con equipos, herramientas, dispositivos y otros; relacionados con la producción (5). En la industria minera, lograr todos los objetivos del proyecto con buenos resultados es una actividad crítica. Por lo tanto, el control de calidad de los equipos es fundamental para evitar riesgos financieros y operativos.

2.2.3 Mantenimientos ejecutados en la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A

Análisis vibracional

El análisis de vibraciones es el proceso de medir el nivel de vibración y la frecuencia de los equipos industriales y utilizar esta información para determinar el estado de la máquina y sus componentes (22). Parte del mantenimiento ejecutado en la Cía. Minera Nexa

Resources Atacocha S.A.A es el análisis de vibraciones que es realizado, a través de la máquina SKF¹ (Figura 2).

LCD display in measurement mode

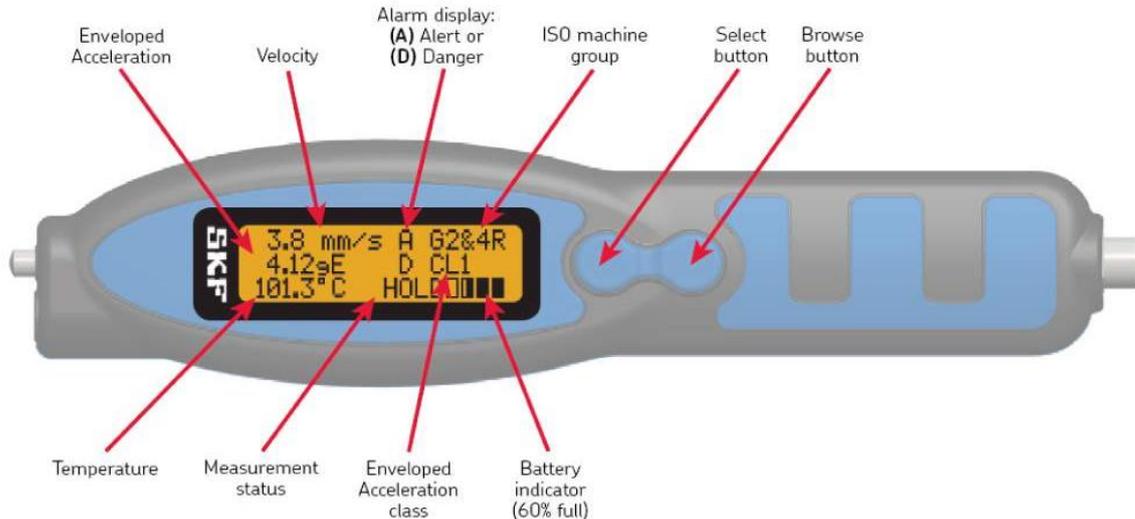


Figura 2. Analizador de la condición de la máquina SKF, proporciona lecturas de vibración globales a velocidad, mide las firmas de vibración de la máquina y las compara automáticamente con los valores de referencia preprogramados de la Organización Internacional de Normalización (ISO). Si las medidas superan estos valores, se muestra una advertencia o un peligro. Tomada de «El Analizador de la condición de la máquina SKF», por Catálogo SKF (23).

Plan de mantenimiento eléctrico

Un plan de cuidado es un documento que engloba un conjunto de actividades de mantenimiento programadas que deben llevarse a cabo en nuestras instalaciones para garantizar un cierto nivel de disponibilidad (24). Es un documento vivo porque se revisa constantemente, fruto del examen de los hechos que se desarrollan en las instalaciones y del análisis de diversos indicadores de gestión

¹ SKF: Svenska Kullagerfabriken

De hecho, los planes de mantenimiento siempre deben revisarse y ajustarse en función de las actividades y los resultados del plan original; como todo sistema de gestión, debe seguir siempre los pasos de planificar, ejecutar, medir y corregir. Nuevamente, el plan se desarrolla para lograr ciertos valores en los indicadores dados y se ajustará (el plan y los indicadores) de acuerdo con los resultados alcanzados (24).

El plan de mantenimiento pasa por varias fases: la división del área de la planta, la especificación de una lista detallada de equipos y su criticidad, que a su vez se divide en sistemas, elementos y componentes utilizando el tipo de mantenimiento más adecuado (24).

A medida que los equipos industriales completan su ciclo de vida, aumenta el potencial de falla o mal funcionamiento; las consecuencias de estos errores pueden ir desde una ligera caída de la producción hasta una interrupción total de la cadena (25). En otras palabras, un plan de mantenimiento adecuado y programado incrementa la eficiencia del proceso, y logra ser significativo para el aumento de la rentabilidad a corto, mediano y largo plazo. Además, evita errores que dan lugar a ciertos accidentes que pueden dañar equipos, instalaciones o incluso al propio personal.

Por otra parte, específicamente un mantenimiento eléctrico consiste en probar los equipos eléctricos para detectar estos posibles problemas en su funcionamiento, tomando acciones correctivas (en respuesta a un incidente específico) o preventivas (inspección periódica regular) (25).

No siempre todos los problemas se detectan a tiempo, y es posible que se “cuelen” algunos errores inesperados, pero con un plan de mantenimiento, este margen se reduce al mínimo (25). Por tanto, de acuerdo con la teoría queda en evidencia la relevancia de implementar un plan de mantenimiento para preservar actualizado las posibles fallas que puede sufrir el equipo y realizar acciones a tiempo. Así también, la importancia de establecer

vínculos con el mantenimiento con un análisis vibracional se fundamenta en que se puede encontrar Dificultades en el equipo de forma inmediata y mediante una adecuada gestión de cuidado, es posible reducir aproximadamente un 30 % de los costos totales asociados al mantenimiento.

Importancia del mantenimiento

Actualmente, las labores de mantenimiento de maquinarias y equipos mineros han recibido mucha atención en la industria, debido a que estos elementos están en contacto diario con los operadores y procedimientos de operación y un ligero descuido ocasiona accidentes los cuales dan mucho miedo (26). Por lo tanto, es importante contar con equipos optimizados, modificados y funcionales para que el trabajo se pueda realizar sin riesgo y peligro (5). En otras palabras, aumentar la vida útil de los equipos a través de labores de mantenimiento, va de la mano con minimizar riesgos laborales y económicos.

Además, siempre será necesario formar profesionales para mantener el equipo en pleno funcionamiento. De hecho, existen empresas que se especializan en brindar servicios de mantenimiento y garantizar la continuidad de los equipos mineros; de esta manera, el control de calidad se vuelve fundamental para cualquier empresa minera (26).

Para evitar tales riesgos financieros y operativos es muy importante contar con un programa de inspección de equipos pesados de minería; en respuesta, Mauricio Riquelme, MBA, consultor de CAMIPER y experto en mantenimiento minero, explica que la inspección tiene dos propósitos, garantizar la disponibilidad de los equipos y apoyar la seguridad del operador. Si está trabajando con un equipo que es propenso a fallar, podría afectar a alguien o causar un accidente fatal, por lo que este tema es relevante; por lo tanto, cualquier empresa minera necesita planificar el mantenimiento continuo del equipo para que pueda detenerse cuando se necesiten cambios y luego poder reanudar el trabajo sin ningún

tipo de interrupción (27). Es decir, que programar debidamente los tiempos de mantenimiento, generará un óptimo desempeño del equipo y evitar paradas.

Tipos de mantenimiento

En el mantenimiento planificado, los estándares o filosofías organizacionales actualmente se pueden distinguir al prevenir fallas inevitables antes o después de que ocurran. Clasificado en reparación reactiva, cuidado proactivo, anticipación de mantenimiento y gestión integral de productividad son formas alternativas de referirse a servicios correctivos, actividades preventivas, técnicas predictivas y gestión del mantenimiento productivo total, respectivamente (5).

Mantenimiento correctivo

El cuidado correctivo es lo que se hace después de que una máquina se descompone para mantenerla en óptimas condiciones y en su mejor estado condiciones mientras esté funcionando. En algunos casos, es adecuado para canteras pequeñas y obras viales de corto plazo, porque suele ser costoso y de riesgo, ya que no se puede garantizar la producción por tonelada y el precio por hora para minas medianas o grandes a mediano plazo (28). En otros términos, es el actuar del área técnica en respuesta a una falla del equipo que está en funcionamiento o activo.

De acuerdo con Barrios y Calderón (28), el cuidado correctivo se divide en dos tipos de actividades:

Situaciones no planificadas o urgentes: son acciones que se realizan de manera prioritaria, interrumpiendo todo lo que está sucediendo, con el fin de atender la situación en el menor tiempo posible y de la forma más urgente, ya que la omisión puede afectar el negocio.

Planificado: sin cambiar el plan de acción previamente desarrollado, se inicia después de la finalización de las acciones a realizar, esto se puede hacer cerca de la fecha anterior a la emergencia o cuando se cree que la planta o el equipo están fuera de servicio.

Mantenimiento preventivo

Se entiende por cuidado preventivo, similar a la acción de reparar o sustitución de piezas al final de un período predeterminado, para reducir la posibilidad de sufrir daños y experimentar pérdidas en la producción. Durante las inspecciones regulares, se analiza la condición de la máquina y se planifican los procedimientos correctores necesarios para que se lleven a cabo en el momento más adecuado y antes de que se produzcan defectos (28). Dicho de otra manera, son actividades de mantenimiento que se realizan de manera programada, que generalmente previenen posibles fallas futuras.

Ventajas del mantenimiento preventivo:

- Minimizar los errores y el tiempo de inactividad.
- Aumento de la vida útil de los equipos y equipos.
- Reducir los niveles de inventario.
- Reducir los costos de mantenimiento.
- Promover una cultura más organizativa en la empresa.
- Ahorro de costes financieros de la empresa.

Mantenimiento predictivo

La anticipación del cuidado que involucre el empleo de herramientas y métodos para evaluar medidas físicas, así como la inspección regular el equipo y la toma medidas para evitar fallas es fundamental. Por extrapolación, anticipar el momento y lugar de la falla del equipo es un método más preciso y correcto que el establecimiento estadístico de momentos

alternativos que ocurren en los programas de mantenimiento preventivo convencionales (28). En otros términos, es realizar una evaluación predictiva a partir de datos previamente tomados en las inspecciones, interpretar y encontrar los patrones, para prever los modos de falla del equipo.

Por su parte, Olarte (29) menciona algunos métodos de mantenimiento predictivo ampliamente utilizados en la industria:

Examen de vibraciones. Consiste en analizar el desempeño de maquinaria rotativa mediante el estudio de su comportamiento vibratorio, aplicándose a todos los equipos tienen algún grado de vibración, incluso cuando funcionan correctamente; sin embargo, cuando ocurren irregularidades, estos niveles normales de vibración pueden cambiar, lo que indica que se debe inspeccionar el equipo. La operación adecuada requiere el conocimiento de su velocidad de rotación, tipo de cojinete, correa, número de cuchillos, cuchillos, entre otros. Asimismo, es importante determinar el lugar de la máquina donde se va a realizar la medida y el equipo analizador más adecuado, para investigación (29).

Termografía. Esta es una técnica que examina la temperatura de los dispositivos con el fin de verificar su correcto funcionamiento, se evalúa la energía que emana el dispositivo Desde su superficie, se mueve a la velocidad de la luz en la forma de ondas electromagnéticas; la cantidad de energía está directamente relacionada con su temperatura, lo que significa que cuanto más caliente está, más energía se libera. Dado que estas ondas poseen una longitud superior a la capacidad de detección del ojo humano, se necesitan instrumentos que conviertan Esta energía se encuentra dentro del espectro visible, lo que permite observar y analizar cómo se distribuye (27).

Análisis por ultrasonido. Se fundamenta en la investigación de las ondas sonoras de alta frecuencia generadas cuando algo falla en el equipo, el dispositivo responsable de

transformar las ondas ultrasónicas en ondas audibles recibe el nombre de medidor o detector ultrasónicos. Con estos instrumentos, la señal de ultrasonido convertida se puede escuchar en auriculares o ver en una pantalla, El empleo de este dispositivo posibilita identificar fricciones en maquinaria giratoria, detectar fallos o escapes en válvulas, hallar fugas de líquidos, percibir pérdidas sonoras en sistemas de vacío, identificar arcos eléctricos, entre otras aplicaciones (29).

Análisis de aceite. Evaluar el estado de funcionamiento de la máquina según las propiedades físicas y químicas del aceite lubricante de la máquina; esta tecnología puede evaluar el nivel de contaminación y/o deterioro del aceite mediante una serie de pruebas realizadas en laboratorios especializados, utilizando muestras tomadas ya sea con el equipo en operación o recién detenido (29).

Mantenimiento productivo total (Total Productive Maintenance)

En este caso, los operadores de producción son responsables del cuidado preventivo de sus instalaciones de producción, involucrando a todo el personal de la mina (28).

Mantenimiento basado en la condición (Condition Based Maintenance)

Estrategia del cuidado, acorde la situación del estado actual de la máquina para determinar las acciones a tomar en el mantenimiento; su objetivo es que el cuidado que se realiza solo cuando se observan ciertos marcadores que señalan un rendimiento degradado o una falla inminente. Algunas métricas pueden incluir métricas como inspección visual, datos de rendimiento e inspección programada (28).

2.2.4 Variable de análisis vibracional y mediciones eléctricas

Definición de vibración

De manera bastante sencilla, la vibración se refiere a un movimiento de vaivén de baja amplitud que experimentan todos los cuerpos tienen una señal vibratoria en la que se

plasma cada una de sus características. A partir de esto, la máquina muestra su firma vibratoria, que contiene información sobre cada uno de sus elementos constituyentes. En consecuencia, la señal de vibración de la máquina implica la combinación o suma total de los vectores de vibración que emana de cada uno de sus elementos constituyentes (1). En suma, la vibración es la oscilación de cualquier objeto en relación con un punto de referencia.

Según la Normativa ISO 2041, sobre monitoreo de condiciones, golpes y vibraciones mecánicas todas las vibraciones, se consideran cambios en el tiempo cuya magnitud caracteriza la condición o posición de un sistema mecánico, si esta magnitud varía periódicamente por encima y por debajo de un valor medio o de referencia (30).

En un entorno más industrial, el movimiento de una máquina se manifiesta a través de la vibración o sus componentes hacia adelante y hacia atrás desde un estado estable en cualquier dirección del espacio. La vibración a menudo es causada debido a inconvenientes mecánicos como, por ejemplo, desequilibrio de los elementos giratorios, desalineación del acoplamiento, engranajes que han sufrido desgaste o daño, cojinetes desgastados, problemas aerodinámicos o hidráulicos y eléctricos (1).

La vibración más básica que se puede lograr es de tipo sinusoidal, cuya representación visual cambia a lo largo del tiempo (señal temporal), como se ilustra a continuación (22).

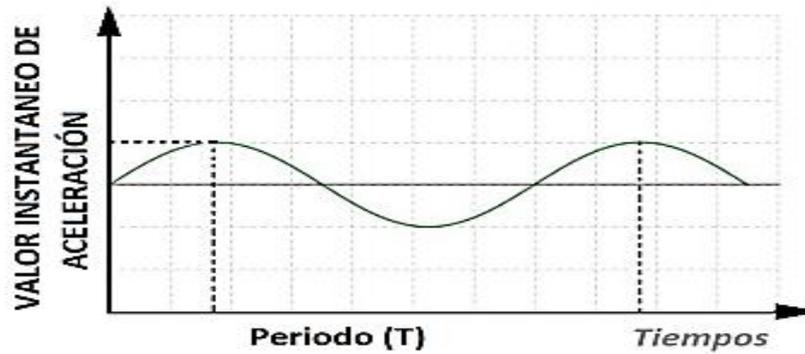


Figura 3. Ilustración de la vibración: configuración de onda sinusoidal. Tomada de «Introducción al Análisis de Vibraciones», por White (1).

Cuando el molino de bolas está funcionando, genera vibraciones de impacto, lo que producirá un fuerte sonido de impacto y empeorará el desgaste entre las superficies de los dientes (20).

En los motores eléctricos, el punto de control de vibraciones debe corresponder al rodamiento o la línea central del rodamiento. Es necesario ubicar el sensor en una carcasa sólida, no en una cubierta protectora; cuando sea posible, mida deben instalarse sensores en las direcciones horizontal (H), vertical (V) y axial (A) para cada rodamiento. En la posición de lado libre, no es factible colocarlos siempre en la línea central, el sensor; ya que la cubierta del ventilador bloquea el sensor, pero se recomienda estar lo más cerca posible del rodamiento; es importante tener en cuenta los puntos de manejo y siempre recopilar datos en el mismo lugar (22). Dicho de otra manera, al elegir un punto de control de vibraciones, la seguridad es lo primero, se tiene que asegurar de no tocar las piezas giratorias o calientes; la seguridad de la recopilación de datos es en beneficio de la herramienta y de la salud del trabajador.

Características de la vibración

a) Frecuencia

La frecuencia se define como la cantidad de ciclos completados en un intervalo de tiempo, y la unidad típica es CPM (ciclos por minuto). La frecuencia tiene la relación significativa con la velocidad angular del componente rotativo se evidenciará al correlacionar los CPM con las RPM (ciclos por minuto-revoluciones por minuto), lo que permitirá identificar la causa de la vibración y el problema subyacente. Esta conexión se explica por la fuerza cambia de orientación y tamaño de acuerdo con la velocidad de rotación, varios las frecuencias permiten identificar problemas correspondientes la velocidad de rotación o cada tipo de problema se caracteriza por sus múltiplos de frecuencia de vibración únicos.

La magnitud de la vibración ofrece una indicación sobre la importancia y gravedad del problema; esta característica proporciona una comprensión del estado de la máquina y puede medirse del movimiento, la rapidez o la aceleración. La frecuencia por debajo de 600 CPM (ciclos por minuto) se mueve, la velocidad objetivo-medida se encuentra en el rango de 600 cm a 6000 CPM, y la aceleración se mide más de 6000 CPM (31). Es decir, las vibraciones producidas por el equipo en su mayoría no cuentan con una frecuencia determinada, es sino una mezcla de vibraciones con diversas frecuencias y distintos problemas.

Frecuencia de estimulación. Es la frecuencia (Hz) asociada a la fuerza externa que actúa relativo al sistema mecánico bajo consideración y experimenta variaciones de manera armónica en problemas de vibración forzada por estimulación armónica. En caso de que ω represente la frecuencia natural del sistema y ω' es la frecuencia de estimulación, entonces la relación entre las dos frecuencias se denomina β , donde (32):

$$\beta = \frac{\omega'}{\omega}$$

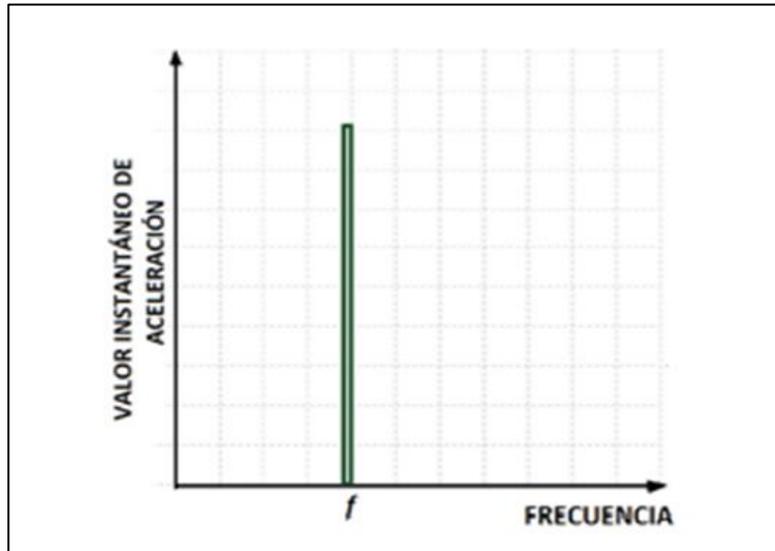


Figura 4. Representación de las frecuencias presentes en una onda sinusoidal. Tomada de «Introducción al Análisis de Vibraciones», por White (1).

b) Variación en la posición

La magnitud del cambio de posición es la medida directa partiendo de una posición inicial o punto de equilibrio hasta un objeto. Además, de la variación en la posición, los objetos que vibran también tienen cambios en la velocidad y la aceleración, Se encuentran por debajo de 600 CPM y están vinculados a los esfuerzos de flexión de sus componentes (22).

c) Velocidad

La velocidad se establece como el cambio en el desplazamiento, generalmente medido en in/s (pulgadas por segundo) o $\frac{mm}{s^2}$, varía en el rango de 600 a 60,000 ciclos por minuto (CPM) está asociado con la fatiga del material (22).

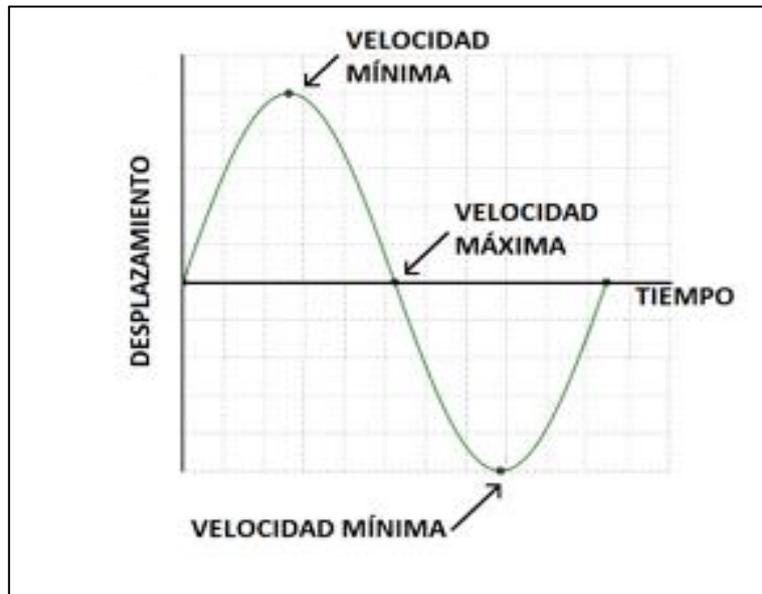


Figura 5. Representación visual de la velocidad de un objeto en vibración. Tomada de «Introducción al Análisis de Vibraciones», por White (1).

d) Aceleración

La aceleración se define como un cambio en la velocidad expresado en g (La aceleración media debida a la gravedad en la superficie terrestre) o $\frac{mm}{s^2}$ (22).



Figura 6. Representación visual número 6 que ilustra la aceleración de un objeto en vibración. Tomada de «Introducción al Análisis de Vibraciones», por White (1).

Normas y estándares

Es posible establecer límites aceptables para las vibraciones de los motores eléctricos encontrar en la norma ISO 10816-3 (33): Maquinaria industrial que cuenta con una potencia nominal superior a 15 kilovatios y opera a velocidades que oscilan entre 120 y 15,000 revoluciones por minuto (RPM); las pautas de NEMA e IEC también establecen ciertos criterios para la aceptación, sus valores son superiores que opera a 60,000 CPM y está vinculado a las fuerzas actuales en el equipo.

Criterios para medir y evaluar la severidad de la vibración, de los cuales hay dos categorías principales, criterios de prueba de aceptación de la máquina y criterios para monitorear la vibración de la máquina durante la fase de arranque la segunda categoría contiene parámetros utilizados para evaluar el estado de las máquinas y sus niveles de vibración (33).

Análisis de vibraciones

La evaluación de vibraciones es una técnica no invasiva que se emplea para supervisar el estado de los activos durante el arranque el apagado y la operación diaria. Esta técnica se aplica principalmente en maquinaria en rotación, como turbinas de vapor, turbinas de gas, bombas, motores eléctricos, compresores, maquinaria de papel, trenes de laminación, equipos herramienta y cajas de cambios (1).

Todas las máquinas experimentarán un cierto nivel de vibración durante el funcionamiento, se considera normal, cuando se pronostica un cambio en el nivel de vibración, la intensidad de las vibraciones cambiará, esto señala que hay un mal funcionamiento, es hora de verificar, porque hay una relación causal entre la vibración y la falla, y cada equipo en situaciones usuales de trabajo, hay una curva de vibración atributo, al igual que una persona tiene un electrocardiograma característico (1).

Por consiguiente, la evaluación de vibración es entendida como el método para identificar y predecir anomalías en el equipo, a través de vibraciones y frecuencias involucradas.

Criterios de vibración

La figura 7, tomada de la Normativa ISO 10816: Análisis de Máquinas-Vibraciones y Medición de componentes no giratorios (9), muestra los diferentes niveles de severidad basados en la velocidad cuadrática media. Entre ellos, el verde representa máquinas nuevas o reacondicionadas, el amarillo representa máquinas que pueden funcionar indefinidamente, el naranja representa máquinas que no deben operarse durante largos períodos de tiempo y, por último, el rojo representa vibraciones que pueden causar daños a la máquina y a los equipos o componentes relacionados.

								v r.m.s. mm/s	v r.m.s. inch/s	Velocidad Vibración (2 - 1000 Hz n > 600 1/min) (2 - 1200 Hz n > 120 1/min)
								11	0.433	
								7.1	0.280	
								4.5	0.177	
								3.5	0.138	
								2.8	0.110	
								2.3	0.091	
								1.4	0.055	
								0.71	0.028	
rígida	flexible	rígida	flexible	rígida	flexible	rígida	flexible	Fundación		
Bombas > 15 kW radial, axial, diagonal				Máquinas medianas 15 kW < P ≤ 300 kW		Máquinas Grandes 300 kW < P < 50 MW		Tipo de Máquina		
Acople directo		Eje intermedio / Poleas.		Motores 160 mm ≤ H < 315 mm		Motores 315 mm ≤ H				
Grupo 4		Grupo 3		Grupo 2		Grupo 1		Grupo		

A Puesta en operación recientemente.

B Operación para largo plazo.

C Operación para corto plazo.

D Vibración causando daños

Figura 7. Análisis de Vibraciones. Tomada de «Diseño de un Sistema de Monitoreo de Vibraciones Mecánicas en Generadores Hidroeléctricos de Media Potencia», por Maigua et al. (33).

Equipos industriales con una potencia nominal superior a 15 vatios y una velocidad que oscila entre 120 y 15,000 RPM. Las diferentes máquinas que se incluye en el estándar son (9):

- Turbinas de vapor con una capacidad de hasta 50 megavatios.
- Turbinas de vapor con una potencia superior a 50 megavatios y velocidades que están por debajo de 1500 o por encima de 3600 RPM.
- Dispositivos rotativos de compresión.
- Turbinas de gas con capacidad de hasta 3 megavatios.
- Bombas de flujo centrífugo, axial o mixto.
- Equipos generadores, a excepción de su utilización en instalaciones hidroeléctricas y estaciones de bombeo.
- Máquinas eléctricas de cualquier categoría.
- Dispositivos de soplado y aireación.

Definición de mediciones eléctricas

El concepto de medida se entiende como una operación sobre la magnitud de un registro numérico, cuyo conocimiento es fundamental para la investigación científica, maquinaria y equipo, generación, transmisión y distribución de energía, etc. Las medidas se expresan como el producto del valor y la unidad correspondiente (34). Medir se refiere a comparar la cantidad correspondiente con la unidad correspondiente.

Se utiliza una variedad de instrumentos de medición para realizar mediciones eléctricas y se pueden dividir en cuatro categorías principales:

- a) Instrumentos indicadores analógicos, en los cuales una aguja indica, a lo largo de una escala correspondiente, la medida de la magnitud eléctrica (34).
- b) Instrumentos registradores, que registran gráficamente el transcurso del tiempo de la cantidad eléctrica relevante (los registradores modernos se denominan registradores de datos) (34).

- c) Instrumentos digitales, en los que la cantidad eléctrica medida se muestra en la pantalla como un número decimal (34).
- d) Instrumentos totalizadores, que muestran la energía total suministrada en un determinado periodo de tiempo; también se les llama instrumentos de conteo o simplemente contadores (34).

Modos de falla más comunes derivados de las vibraciones

La vibración es un poderoso indicador del estado de la máquina y un análisis cuidadoso puede revelar el estado de cualquier pieza móvil. A continuación, se detallan las fallas más comunes causadas por amplitudes de vibración anormales (35).

- a. *Desgaste prematuro de componentes mecánicos.* El desbalanceo o la vibración excesiva pueden provocar un desgaste prematuro de los componentes mecánicos del motor, como rodamientos, ejes y engranajes. Este desgaste adicional crea fluctuaciones de carga mecánica que afectan indirectamente al sistema eléctrico (35).
- b. *Generación de armónicos.* La vibración puede crear armónicos en la corriente del motor. Los armónicos son componentes de frecuencia no deseada en la forma de onda de corriente eléctrica, lo que pueden afectar la calidad de la energía eléctrica y causar problemas en otros equipos conectados al mismo sistema (35).
- c. *Desalineación de acoplamientos.* La vibración puede causar desalineaciones en las conexiones mecánicas, como entre el motor y la carga. Los cambios pueden generar fuerzas y tensiones adicionales en el sistema eléctrico, provocando un desgaste prematuro de los componentes eléctricos (35).
- d. *Aumento de pérdidas en el motor.* La vibración aumenta la pérdida del motor a medida que las fuerzas vibratorias crean fricción y resistencia adicionales en las piezas mecánicas. Esto da como resultado una mayor producción de calor, lo que

afecta la eficiencia del motor y, en última instancia, aumenta el consumo de energía (35).

- e. *Desequilibrio en la distribución de cargas.* Un desbalanceo mecánico provoca una distribución de carga desequilibrada en el sistema. Esto afecta la eficiencia de convertir la energía mecánica en energía eléctrica y provoca fluctuaciones en el suministro de energía (35).
- f. *Mayor tensión y esfuerzo en conexiones eléctricas.* La vibración puede causar tensión y esfuerzos adicionales en las conexiones eléctricas del motor, incluidos cables y terminales. Con el tiempo, esto puede provocar que las conexiones eléctricas se deterioren, que aumenta la resistencia y generando calor adicional (35).

2.3. Definición de Términos Básicos

2.3.1 Mantenimiento

Una serie de acciones a realizar por el responsable del mismo sector o territorio en que los equipos, maquinarias, elementos y dispositivos que participan en el proceso industrial se encuentran en las condiciones de funcionamiento necesarias para su diseño, construcción, instalación y colocación (36).

2.3.2 Voltaje

La voltaje o diferencia de potencial (V) se describe como la fuerza que impulsa a los electrones entre dos puntos dentro de un circuito eléctrico, medida en voltios (V) (37).

2.3.3 Amperaje

Los amperios a carga completa (FLA) indican la cantidad de corriente que consume un motor a la potencia nominal. En la placa de identificación del ejemplo, esperamos que consuma 5,4 amperios cuando se ejecuta a plena carga con 230 voltios (38).

2.3.4 Molino de bolas

Un molino de bolas es un dispositivo empleado para la trituración y la mezcla de diversos materiales para la mezcla de minerales, pinturas, pirotecnia, cerámica y procesos de sinterización selectiva por láser (39).

2.3.5 Modos de falla

Los modos de falla de difícil detección en un molino de bolas se refieren a posibles problemas o averías que pueden surgir en el equipo y que son complicados de detectar o identificar en etapas tempranas. Estos modos de falla abarcan situaciones como problemas en los rodamientos, desgaste excesivo de los revestimientos, desalineación de las partes y vibraciones anormales, entre otros, que pueden tener un impacto negativo en el funcionamiento y rendimiento del molino. Es esencial identificar y abordar estos modos de falla de manera oportuna y efectiva para mantener el molino en óptimas condiciones y prevenir posibles daños o interrupciones no planificadas (13).

2.3.6 Motor de inducción trifásico

Un motor de inducción trifásico es un dispositivo con la capacidad técnica de convertir la energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción electromagnética (37).

2.3.7 HP (horsepower)

HP, proveniente del término en inglés *horsepower*, y se traduce a “caballos de fuerza”. Esta medida se emplea para expresar la potencia generada por el motor; a medida que el número aumenta, se envía más potencia a las ruedas, lo que teóricamente resulta en una mayor velocidad (20).

2.3.8 Envolvente

La carcasa es la parte del motor que protege al motor del medio ambiente y del contacto humano; los ventiladores mecánicos no deben dejarse en funcionamiento, ya que podrían lesionar al personal en caso de contacto accidental; por lo tanto, se requiere un casillero por razones de seguridad (38).

2.3.9 Temperatura

Los motores de combustión interna generan temperaturas de alrededor de 2000 grados centígrados, lo que significa que una chispa de una bujía enciende una mezcla de combustible y aire comprimido unas nueve o más veces (40).

2.3.10 Corriente

Durante el funcionamiento, la electricidad suministrada al motor se utiliza para generar un campo magnético tanto en el rotor como en el estator. Estos sectores magnéticos se repelen mutuamente e inducen así un par de torsión en el rotor y provocan su rotación (37).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

El estudio es de tipo aplicado considerando la relación entre varios parámetros de vibración del motor de un molino de bolas y las condiciones de falla difíciles de detectar, que afectan indirectamente el sistema eléctrico del motor. Hernández y Mendoza (41) afirmaron que el propósito del trabajo aplicado es encontrar soluciones a problemas prácticos.

3.2 Nivel de Investigación

Hernández y Mendoza (41) consideran que el nivel descriptivo permite recolectar información tal cual se observa en la realidad problemática y en las diversas facetas de intervención que se puede realizar en las mismas.

Por tanto, la investigación es de nivel descriptivo, porque busca realizar una descripción acerca de las vibraciones anormales en el motor del molino de bolas y cómo esta se relaciona con los modos de falla en los componentes del molino; así también, permite conocer los parámetros eléctricos de manera detallada tomando en consideración cada una de sus características.

3.3 Método de Investigación

El método descriptivo, de acuerdo con Yarleque et al. (42), se refiere a que, en este método, el investigador se restringe a realizar observaciones y describir de manera sistemática y precisa los eventos relevantes utilizando las técnicas e instrumentos adecuados más idóneos a la investigación.

Por ello, el estudio es de método descriptivo, ya que busca especificar descriptivamente las vibraciones y evaluaciones eléctricas para conocer la condición del molino de bolas con el fin de mejorar y brindar un servicio óptimo y continuo en la planta de la compañía minera Nexa Resources Atacocha S.A.A.

3.4 Diseño de la Investigación

Un diseño no experimental descriptivo transversal tiene su fundamento en observar y analizar el fenómeno tal y como se muestra en su realidad en un tiempo dado y no implica la manipulación de variables independientes como lo haría un diseño experimental (41).

Por consiguiente, el estudio utiliza ese diseño, porque no hay efectos directos o indirectos sobre los constructos de vibración del molino de bolas y los modos de falla en sus componentes. Puesto que solo se basa excepcionalmente en observar las variables tal o como se dan en su realidad y en la fecha establecida de inspección predictiva de equipos.

M -----> O

Donde:

O= Datos de la variable de análisis vibracional y mediciones eléctricas

M= Muestra, un molino de bolas

3.5 Población y Muestra

3.5.1 Población

Seis (06) molinos de bolas de la empresa minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.

3.5.2 Muestra

Se utilizó un tipo de muestreo probabilístico, donde cada uno de los molinos está en la misma probabilidad de ser seleccionada como muestra de estudio. Al respecto, Hernández y Mendoza (41) sostuvieron que este tipo de muestreo es beneficioso para generalizar los resultados encontrados, así como para reducir errores de generalización en el procesamiento de los resultados.

Por tanto, la muestra para el estudio es el molino de bolas N.º 2 de la empresa minera Nexa Resources Atacocha S.A.A. (Figura 8).



Figura 8. Motor del molino de bolas N.º 2.

3.6 Técnicas de Recolección de Datos

El método para recopilar información fue el registro de datos, porque se recolectó información de las fuentes como informes sobre la base de los datos sobre el estado de disponibilidad de los molinos de bolas de la empresa minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023. Al respecto, Ñaupas et al. (43) indican que esta técnica se basa en un

conjunto de operaciones de recolección informativa relevante y almacenada documentariamente el cual será cuantitativa.

3.7 Instrumentos

Se consideró como instrumento a la hoja de recopilación de información con los cuales se llegó a tener toda la información sobre el estado actual del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A. Frente a ello, Hernández y Mendoza (41) refieren que la ficha de registro es una herramienta que posibilita recabar datos específicos que describan la condición de una variable de estudio.

3.8 Procedimiento de Recopilación de Datos

El proceso de recabar información se inició con la presentación de la solicitud al responsable del área de mantenimiento de los molinos de la empresa minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023., posteriormente se realizarán registros de datos obtenidos de las vibraciones (anexo 5) y mediciones eléctricas de las maquinarias (anexo 7), coincidiendo con las fechas de paradas e inspecciones predictivas de equipos en desde el 01 de noviembre al 4 de marzo del presente año.

Para la obtención de datos de vibración, se usó el medidor de vibraciones tipo pluma CMAS 100 SKF(44); primero, se ubica la máquina en los puntos críticos de mayor vibración del motor y luego se realiza la lectura de datos de la velocidad, aceleración y temperatura, además se interpreta de manera automática y fiable los mensajes de alerta o peligro (figura 9). Finalmente, los datos se suben a la base, para su análisis e interpretación.



Figura 9. Recolección de datos: vibraciones y mediciones eléctricas de las maquinarias. Usando el medidor de vibraciones tipo pluma CMAS 100 SKF

3.9 Procedimiento de Análisis de Resultados

Dentro del proceso de examen de los resultados se orientó al análisis estadístico descriptivo sobre la base de la a la condición de un molino de bolas de la empresa minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023. Asimismo, todo el procesamiento estadístico se realizó en utilización del programa IBM-SPSS-STADISTIC-V 28 y la aplicación de hojas de cálculo Microsoft Excel.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del Tratamiento y Análisis de la Información

Indicar el circuito punto de medición en el sistema intervenido, aparte de instrumento utilizado con su respectiva calibración

Análisis de consumo de corriente

Tabla 2. *Corriente de molino N.º 2*

		L1	L2	L3
N	Válido	20	20	20
	Perdidos	0	0	0
Media		221,4800	222,1500	219,9000
Mediana		210,0000	217,5000	219,5000
Desv. Desviación		26,22172	29,19204	25,95026
Varianza		687,579	852,175	673,416
Mínimo		187,20	185,60	185,60
Máximo		261,00	280,00	261,00

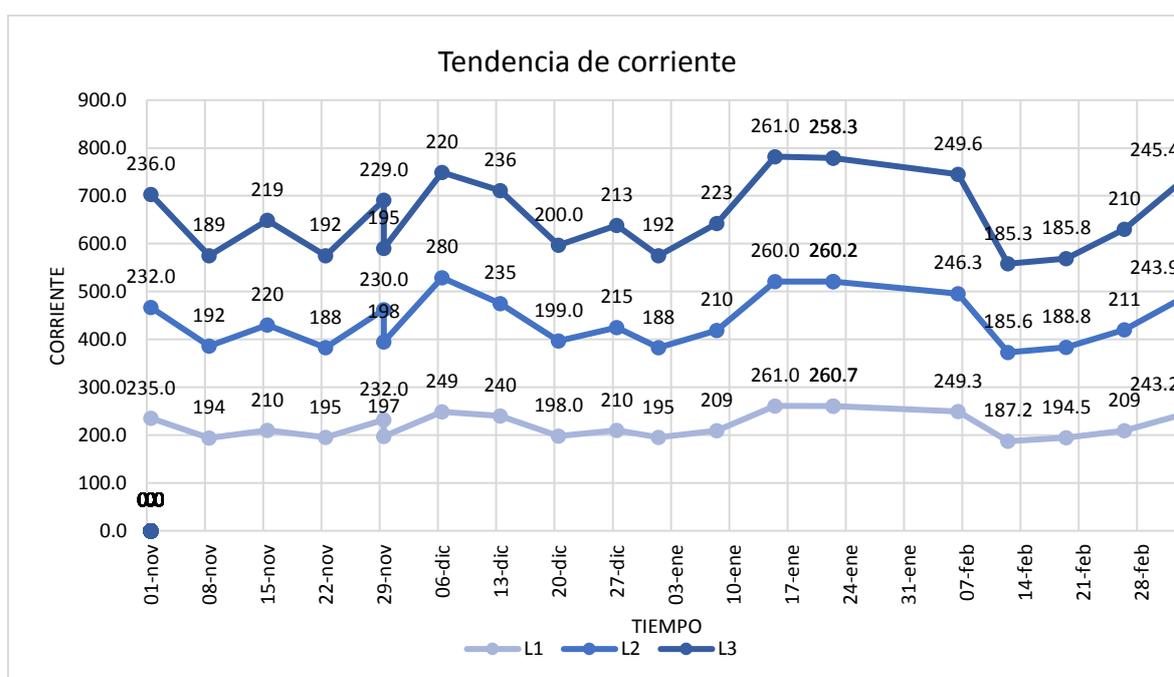


Figura 10. Gráfico de líneas de tendencia de corriente de Molino N.º 2

La tabla 2 muestran las medidas semanales del consumo de corriente del Molino N.º 2 de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A en las fechas del 1 de noviembre hasta el 4 de marzo del 2023. Observamos que en la línea 1, el mínimo valor de consumo eléctrico que se dio en esas fechas fue de 187.20 amperios, y el máximo de 261.00 amperios; por tanto, la media quedaría con 221.48 amperios; para la línea 2, el mínimo valor de consumo eléctrico fue de 185.60 amperios, y el máximo de 280.00 amperios y una media de 222.15 amperios; por último, la línea 3, el mínimo valor de consumo eléctrico fue de 185.60 amperios, y el máximo de 261.00 amperios y una media de 219.9 amperios.

En la figura 10 se observa la tendencia de la corriente por fechas y líneas; donde se evidencia que la fecha del 12 de febrero se mantuvo un mínimo de consumo eléctrico y el 15 de enero hubo mayor demanda de consumo eléctrico de manera conjunta. De acuerdo con la norma no se debe superar el amperaje propuesto en las especificaciones del motor del molino, para este caso es 279 amperios. En los datos se observa que varían los valores constantemente, pero no superan lo establecido; esto afecta la eficiencia de los equipos y tiene un impacto positivo en la vida económica del motor, y se reducen las incidencias de subidas de temperatura.

Análisis de consumo del voltaje de línea

Tabla 3. *Voltaje de molino N.º 2*

		L1-L2	L2-L3	L1-L3
N	Válido	20	20	20
	Perdidos	0	0	0
Media		441,0850	439,6450	440,3600
Mediana		443,5000	441,5000	441,0000
Desv. Desviación		8,77516	8,41343	7,11096
Varianza		77,003	70,786	50,566
Mínimo		429,00	427,00	432,00
Máximo		450,00	448,00	455,00

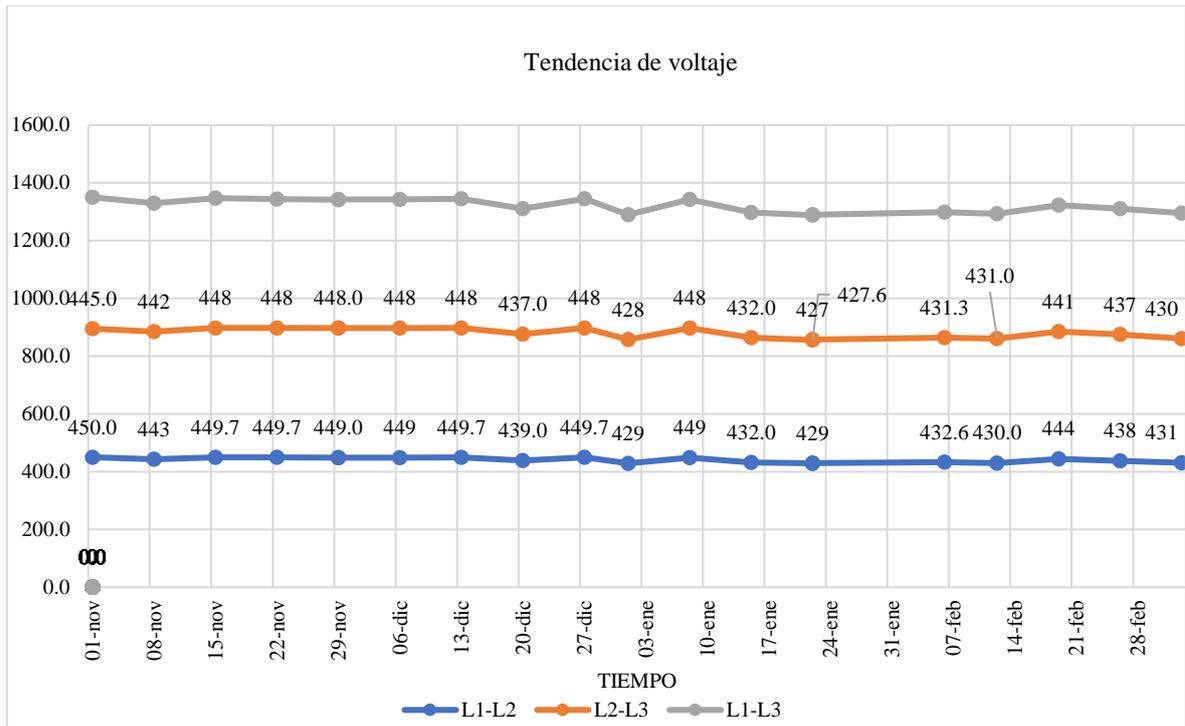


Figura 11. Tendencia de voltaje de Molino N.º 2

Respecto a la tabla 3 y la figura 11 que muestran las medidas semanales del voltaje de línea del Molino N.º 2 de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A en las fechas del 1 de noviembre hasta el 4 de marzo del 2023. Observamos que de la línea 1 a la línea 2, el mínimo valor de voltaje fue de 429V, y el máximo de 450V, por tanto, la media es de 441.085V. Para la línea 2 a la línea 3, el mínimo valor de voltaje fue de 427V, y el máximo de 448V y la media es de 439.645V; y, por último, la línea 1 a la línea 3, el mínimo valor de voltaje fue de 432V, y el máximo de 455V, por tanto, la media es de 440.36V. De acuerdo con la norma, la tensión no debe ser superior al 5 % de la tensión nominal (462 V) y tampoco inferior al 5 % de la tensión nominal (418 V).

Se observa que el voltaje si superó la tensión nominal (440 V) en las fechas de toma de datos; pero no excedieron el límite permisible (462 V) ni estuvieron por debajo del mínimo permitido por la normativa vigente (418 V); por tanto, inferimos que el voltaje se encuentra dentro de los parámetros normales.

Análisis de la envolvente del molino N.º 2

Tabla 4. *Envolvente de molino N.º 2*

N	Valores perdidos	20 0
	Media	,6080
	Mediana	,5850
	Desv. Desviación	,26100
	Varianza	,068
	Mínimo	,20
	Máximo	1,20

Tabla 5. *Clasificación de medición de aceleración envuelta*

Clase	OK	Alerta	Peligro
CL1	0 -1 gE	1 -2 gE	más 2 gE
CL2	0 -2 gE	2 -4 gE	más 4 gE
CL3	0 -4 gE	4 -10 gE	más 10 gE

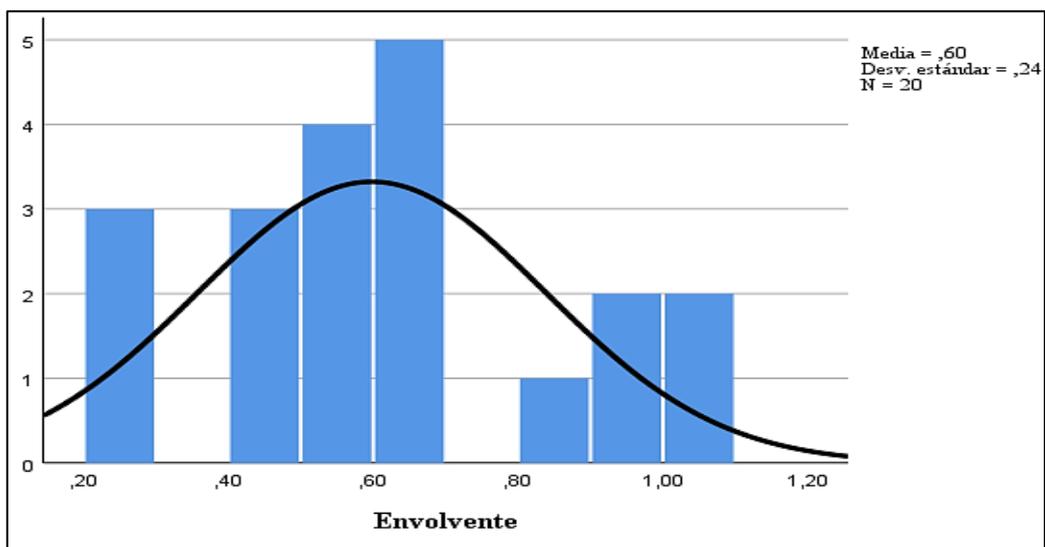


Figura 12. *Tendencia de envolvente de molino N.º 2*

Respecto a la tabla 4 y figura 12 que muestran las medidas semanales de la envolvente del molino N.º 2 de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A en las fechas del 1 de noviembre hasta el 4 de marzo del 2023, la envolvente de aceleración es la forma más precisa de detectar fallas en los rodamientos en sus primeras etapas.

Observamos que los valores de la envolvente varían, pues el mínimo valor fue de 0.2, y el máximo de 1.2. De acuerdo con la tabla 5 de clasificación de máquinas para medición de aceleración envuelta (envolvente), el motor del molino es de clase CL2, donde si el envolvente muestra valores desde 0-2gE se encuentra en estado Ok, de 2-4 gE está en alerta y más de 4 en peligro. Por tanto, al obtener datos inferiores a lo establecido en la clasificación, esta característica está en estado normal.

4.2 Análisis de Información de Vibraciones

Tabla 6. Niveles máximos de vibración

mm/seg-RMS	SFK Machine Condition Advisor CMAS100-LS		Normal					
Potencia mínima	>15 Kw	20 RPM-15000 RPM	Operación sin restricción					
CL3	CL2	CL1	Operación con restricción					
1800-3600 rpm	500-1800 rpm	< 500 rpm	Acción					
Ø eje= 2cm-15cm	Ø eje= 5cm-30cm	Ø eje= 20cm-50cm	Condición					
Clases	Clase IV		Clase III		Clase II		Clase I	
Estado	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible
A	0-1.4	0-2.3	0.-2.3	0-3.5	0-1.4	0-2.3	0-2.3	0-3.5
B	1.5-2.8	2.4-4.5	2.4-4.5	3.6-7.1	1.5-2.8	2.4-4.5	2.4-4.5	3.6-7.1
C	2.9-4.5	4.6-7.1	4.6-7.1	7.2-11	2.9-4.5	4.6-7.1	4.6-7.1	7.2-11
D	4.6-mas	7.2-mas	7.2-mas	12-mas	4.6-mas	7.2-mas	7.2-mas	12 -mas
Potencia	>15 kw		15kw<P≤ 300kw			300kw<P<50Mw		

Tabla 7. Vibración lado ventilador de molino N.º 2

		1V	1H	1A
N	Válido	20	20	20
	Perdidos	0	0	0
	Media	2,7900	2,7700	2,7150
	Mediana	2,8000	2,7000	2,4000
	Desv. Desviación	,22219	,47804	,62262
	Varianza	,049	,229	,388
	Mínimo	2,50	2,00	2,10
	Máximo	3,20	4,20	4,20

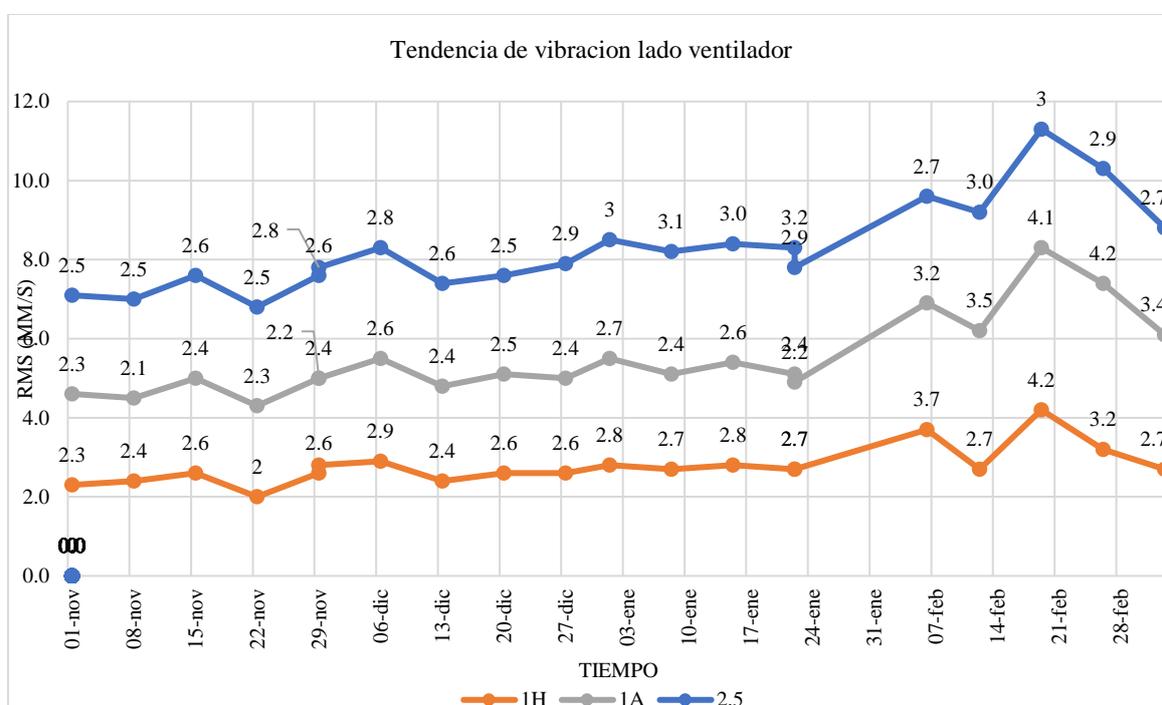


Figura 13. Tendencia de vibración lado ventilador de molino N.º 2

Respecto a la tabla 7 y la figura 13 que muestran las medidas semanales de las vibraciones del lado del ventilador del motor del molino de bolas N.º 2 de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A en las fechas del 1 de noviembre hasta el 4 de marzo del 2023, observamos que el mínimo valor analizado es de 2.50 vertical, 2.00 horizontal y 2.10 axial; en cuanto a los valores máximos 3.20 vertical, 4.20 horizontal y 4.20 axial. De acuerdo con los estándares internacionales para la vibración mecánica normas ISO 10816-3 (tabla 6)

para establecer el estado del motor del molino N.º 2, verde es un estado normal, amarillo está en operación sin restricción, naranja en operación con restricción y rojo requiere acción (anexo 1).

Se observa que, en su mayoría de resultados, la vibración del lado del ventilador está en un estado de operación sin restricción y lo demás llegó a un estado de operación con restricción. Todo ello indica que hay evidencia de fallas en el equipo, además la observación realizada en la inspección se evidencia residuos de aceite en el visor parte de acople en el motor y la tapa bornera le falta ajuste (anexo 6), colocación de prensa estopa lado ventilador y en la caja de bornes.

Tabla 8. *Vibración lado acople de molino N.º 2*

		2V	2H	2A
N	Válido	20	20	20
	Perdidos	0	0	0
	Media	3,1300	3,5350	2,4850
	Mediana	2,9500	3,0000	2,2500
	Desv. Desviación	,74629	1,09221	,66434
	Varianza	,557	1,193	,441
	Mínimo	2,40	2,60	1,80
	Máximo	5,30	6,10	3,90

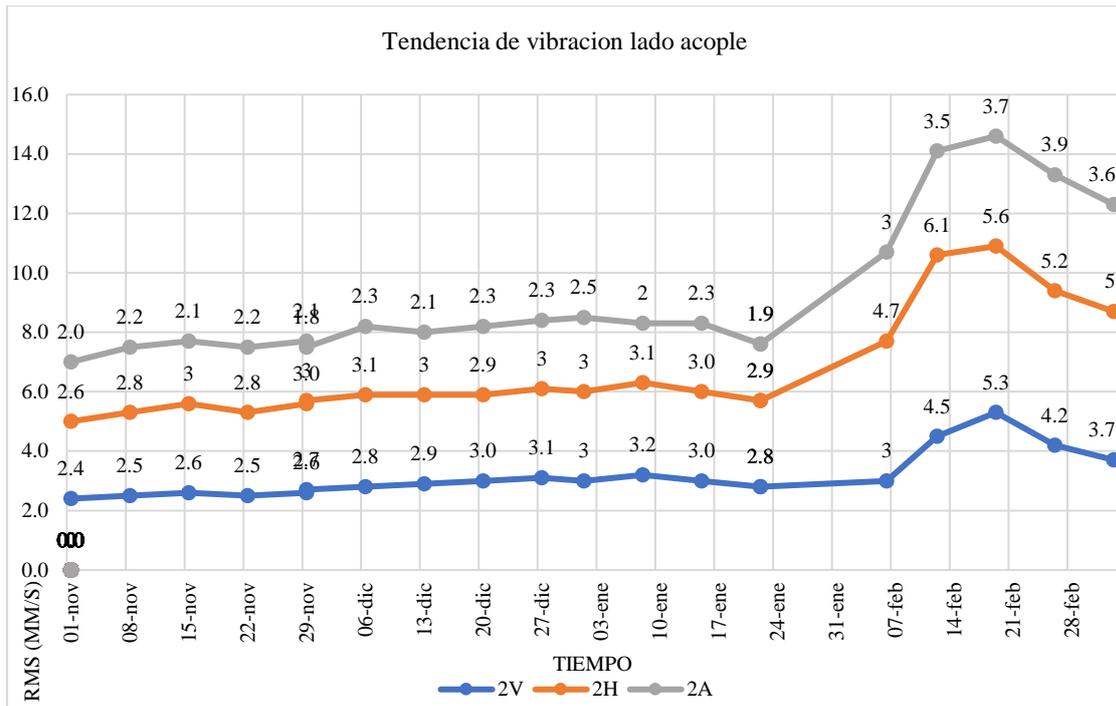


Figura 14. Tendencia de vibración lado acople de molino N.º 2

Respecto a la tabla 8 y la figura 14 que muestran las medidas semanales de las vibraciones del lado acople del motor del molino de bolas N.º 2 de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A en las fechas del 1 de noviembre hasta el 4 de marzo del 2023., observamos que el mínimo valor analizado es de 2.40 vertical, 2.60 horizontal y 1.80 axial; en cuanto a los valores máximos 5.30 vertical, 6.10 horizontal y 3.90 axial. De acuerdo con los estándares internacionales para la vibración mecánica normas ISO 10816-3 (tabla 5) para establecer el estado del motor del molino N.º 2, verde es un estado normal, amarillo está en operación sin restricción, naranja en operación con restricción y rojo requiere acción (anexo 1).

Se observa que, en su mayoría de resultados, la vibración del lado acople está en un estado de operación sin restricción, pero también llegaron a un estado de operación con restricción y a un estado de acción. Todo ello indica, que hay evidencia de fallas en el motor en el periodo de recolección de datos.

Análisis descriptivo de temperatura del motor del molino N.º 2

Tabla 9. *Temperatura lado izquierdo de molino N.º 2*

		L.V.	C	L.A
N	Válido	20	20	20
	Perdidos	0	0	0
	Media	95,8750	104,6700	83,7950
	Mediana	99,4000	110,0000	89,5000
	Desv. Desviación	25,37717	18,49410	25,02633
	Varianza	644,001	342,032	626,317
	Mínimo	46,70	45,80	40,10
	Máximo	145,00	131,00	124,00

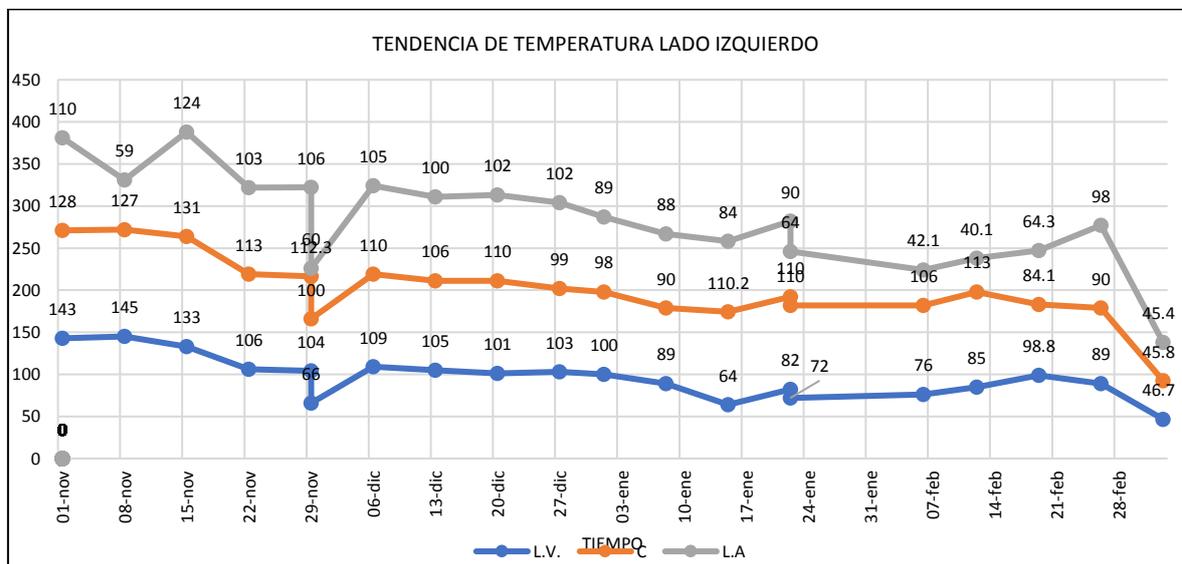


Figura 15. *Tendencia de temperatura lado izquierdo de Molino N.º 2*

Respecto a la tabla 9 y la figura 15 que muestran las medidas semanales de las temperaturas del lado izquierdo del motor del molino de bolas N.º 2 de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A en las fechas del 1 de noviembre hasta el 4 de marzo del 2023, observamos que de manera general las mínimas temperaturas marcaron, 46.70° C en el lado ventilador, 45.80° C centro y 40.10° C en el lado acoplamiento; por otra parte, las temperaturas máximas que se registraron fueron 145° C en el lado ventilador, 131° C centro y 124° C en el lado acoplamiento. De acuerdo con especificaciones de fábrica, si el motor

es fabricado con el aislamiento F como lo es el caso de motor del molino N.º 2, se puede permitir llegar a una temperatura máxima de 155° C. Entonces, como el máximo valor de temperaturas no superó las especificaciones de fábrica, se establece que se encuentra en un estado normal en cuanto a temperatura.

Tabla 10. *Temperatura lado derecho*

N	Válido	L.V.	C	L.A
	Perdidos	20	20	20
		0	0	0
	Media	115,3850	105,6800	89,2650
	Mediana	108,5000	108,5000	92,5000
	Desv. Desviación	79,83044	14,13784	23,95444
	Varianza	6372,899	199,879	573,815
	Mínimo	41,80	67,10	41,20
	Máximo	142,00	130,00	125,00

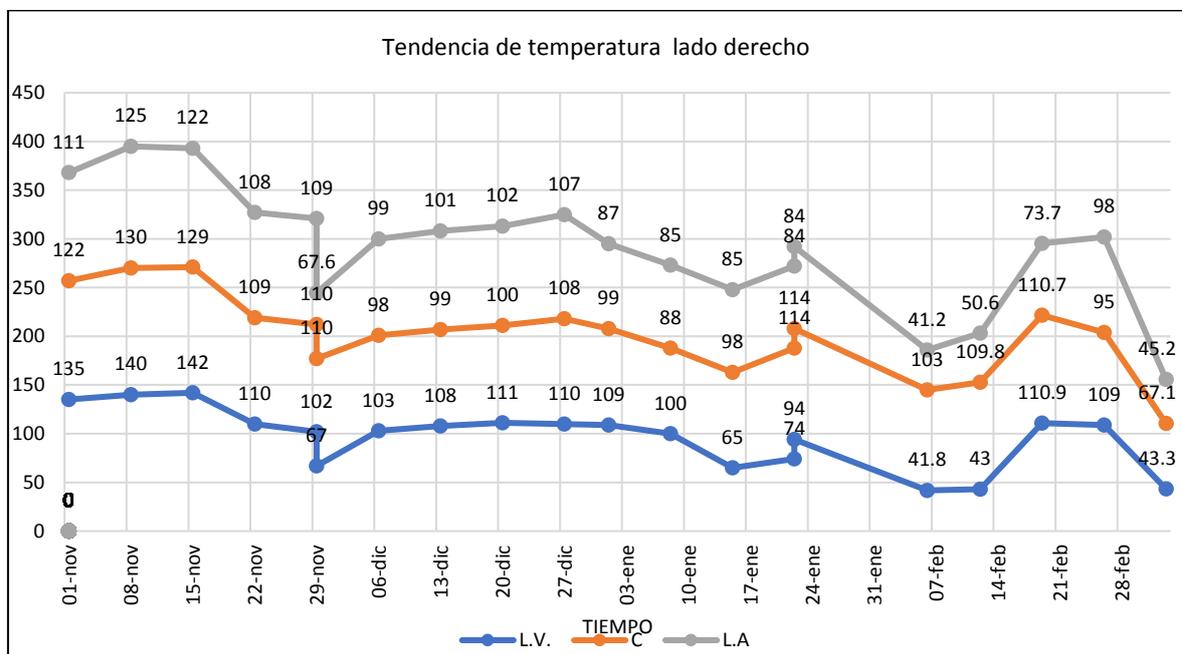


Figura 16. Tendencia de temperatura lado derecho

Respecto a la tabla 10 y la figura 16 que muestran las medidas semanales de las temperaturas del lado derecho del motor del molino de bolas N.º 2 de la Cía. Minera Nexa

Resources Atacocha S.A.A en las fechas del 1 de noviembre hasta el 4 de marzo del 2023, observamos que de manera general las mínimas temperaturas marcaron, 41.80° C en el lado ventilador, 67.10° C centro y 41.20° C en el lado acoplamiento; por otra parte, las temperaturas máximas que se registraron fueron 142° C en el lado ventilador, 130° C centro y 125° C en el lado acoplamiento. De acuerdo con especificaciones de fábrica, si el motor es fabricado con el aislamiento F como lo es el caso de motor del molino N.º 2, se puede permitir llegar a una temperatura máxima de 155° C. Entonces, como el máximo valor de temperaturas no superó las especificaciones de fábrica, se establece que se encuentra en un estado normal en cuanto a temperatura.

4.3 Discusiones de Resultados

Se planteó como hipótesis general que la afectación de las vibraciones está directamente relacionada con la aparición de modos de falla de difícil detección en el molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023. Donde se obtuvo, en su mayoría de resultados, que la vibración del lado del ventilador está en un estado de operación sin restricción y lo demás llegaron a un estado de operación con restricción; así también el lado acople está en un estado de operación sin restricción, pero también llegaron a un estado de operación con restricción y a un estado de acción. Todo ello indica, que hay evidencia de fallas en el equipo, además en la observación realizada en la inspección se evidencia residuos de aceite en el visor parte de acople en el motor y la tapa bornera le falta ajuste (anexo 6), colocación de prensa estopa lado ventilador y en la caja de bornes. Por tanto, es evidente que existe una relación entre las vibraciones y la aparición de modos de falla que son de difícil detección, lo que requiere un enfoque integral para la detección temprana y la gestión eficiente de los modos de falla.

Los hallazgos coinciden con los de López y López en su tesis “Implementar un sistema de protección automática para molinos cañeros basado en el análisis de vibraciones”

(15), donde demostró la eficacia del uso de sistemas automáticos de protección contra vibraciones, porque no solo prolonga la vida útil del equipo, sino que también garantiza un servicio de excelencia que cumple con todos los estándares de bienestar y calidad prescritos, también en la viabilidad económica, determina la recuperación de la inversión para obtener ventajoso para las partes interesadas. Así también, Narvaez propone un plan de mantenimiento anticipado del molino de bolas, basado en el enfoque de evaluación de modos y consecuencias de fallos (FMEA), donde les arroja datos de los modos de falla, sus causas y efectos. Por último, los niveles normales de vibración pueden cambiar, lo que indica que se debe inspeccionar el equipo; la operación adecuada requiere el conocimiento de su velocidad de rotación, tipo de cojinete, correa, número de cuchillos, entre otros. También es importante determinar el lugar de la máquina donde se va a realizar la medida y el equipo analizador más adecuado (29).

En cuanto a la hipótesis específica 1, donde se plantea que mediante la aplicación de técnicas de manejo y análisis de vibraciones, es posible identificar y evaluar de manera efectiva las vibraciones y resonancias anormales, lo cual permitirá detectar posibles fallas o desgaste en sus componentes de difícil detección en el molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023. Según los resultados, se obtuvo que las vibraciones no se encuentran en niveles óptimos para el funcionamiento de acuerdo con el análisis con los estándares internacionales para la vibración mecánica normas ISO 10816-3 (tabla 5). Por otra parte, el análisis de la envolvente muestra que el motor del molino es de clase CL2 está en estado normal; y no afecta en la funcionalidad de la máquina. A partir de ello inferimos que la aplicación de técnicas de manejo y análisis de vibraciones nos permite identificar y evaluar algunas resonancias anormales y sobre la base de ello reconocer de manera más eficiente las fallas o desgastes en sus componentes de difícil detección en el motor del molino.

Para Andrade y Ramos (18), la solución para detectar fallas de manera anticipada es la introducción de la estrategia de mantenimiento centrado en la confiabilidad en la sección de trituración principal de una compañía minera; este proceso implica la recopilación y evaluación de registros históricos de fallos y actividades de mantenimiento para evaluar el estado actual de los equipos. Asimismo, Cadmen y Orozco(13) analizaron que la mayoría de los procesos industriales pueden fallar y las pérdidas podrían implicar pérdidas financieras y daños permanentes o incluso la preservación de vidas humanas. Por ello, la industria necesita actualmente sistemas especializados para identificar y gestionar errores; sistemas que garanticen seguridad, confiabilidad y faciliten la supervisión y detección de fallas.

Por su parte Figueroa (11), luego de analizar el equipo de acuerdo con varios parámetros como la cantidad de tiempo en el funcionamiento, cantidad de fallos, intervalo entre fallos, disponibilidad y gastos de mantenimiento, combinado con una encuesta de expertos responsables del mantenimiento, operación y gestión del área controlada, usó el método RCM II, que identifica fallas y establece soluciones para el mantenimiento en determinados intervalos de tiempo. Por lo que se logró reducir costos de mantenimiento en un 59 % y sobre la base de ello propuso mejoras en la administración de procesos actuales de la empresa.

Para la hipótesis específica 2, se postula que las vibraciones afectan la evaluación de magnitudes eléctricas, como la corriente y el voltaje o consumo de energía, tanto en el sistema eléctrico general como en los componentes específicos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023. Frente a ello, en los resultados se observó que en cuanto al consumo de corriente varían los valores constantemente pero no superan lo establecido en la norma de especificaciones del motor; esto beneficia la operatividad de los equipos, tiene un impacto positivo en la vida económica del motor, y se reducen las incidencias de subidas de temperatura. De igual modo, en cuanto al voltaje de

línea, de acuerdo con la norma, la tensión no debe ser superior al 5 % de la tensión nominal (462 V) y tampoco inferior al 5 % de la tensión nominal (418 V). Se observa que el voltaje si superó la tensión nominal (440 V) en las fechas de toma de datos; pero no excedieron el límite permisible (462 V) ni estuvieron por debajo del mínimo permitido por la normativa vigente (418 V); por tanto, inferimos que el voltaje se encuentra dentro de los parámetros normales y no afecta en la funcionalidad del equipo. Todo ello indica, que no hay evidencia que las vibraciones afectan de alguna manera la medición de parámetros de voltaje.

Los resultados coinciden con los estudios Valenzuela (10), con base en una evaluación del potencial de la planta SAG para ahorrar electricidad y aumentar el rendimiento, afirma que mejorar el sistema de molienda podría aumentar la efectividad del procedimiento y permitir importantes ganancias financieras anuales capitalizados. También, Zamora (12) nos menciona que los planes de mantenimiento en el área de molienda, Debe estar vinculado con el entrenamiento de los mecánicos de la compañía y el esfuerzo continuo por normalizar el estado de los equipos.

CONCLUSIONES

1. A nivel general, se concluye que existe un impacto negativo a partir de vibraciones anormales, que generan distintos modos de falla; ello conlleva a suscitar futuros planes de detección temprana y gestiones de riesgo en el sistema de molienda de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023. Además, es importante realizar inspecciones constantes para lograr una mejor operatividad del equipo.
2. Se logró identificar y evaluar las vibraciones, así como algunas resonancias anormales y sobre la base de ello se reconoce de manera más eficiente las fallas o desgastes en el motor del molino de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023. Del mismo modo, la mayoría de los procesos industriales pueden fallar y las pérdidas pueden ser económicas, daños permanentes o incluso vidas humanas. Por ello, es esencial nuevos sistemas expertos para la detección y control de fallas oportunas.
3. Las vibraciones no afectan la medición de parámetros eléctricos, como corriente, voltaje o consumo de energía, tanto en el sistema eléctrico general como en los componentes específicos de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar un sistema de protección vibracional en los molinos de bolas de las Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A, como medio alternativo diagnóstico y de análisis preventivo en fallas de la máquina; esto con el fin de proteger los componentes y el adecuado funcionamiento eléctrico de los mismos.
- Se sugiere implementar un plan de mantenimiento preventivo de resonancias anormales en el molino de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A con la finalidad de identificar fallas a tiempo que permite interponer medidas correctivas que evite el estancamiento funcional. Por otra parte, es necesario tener en cuenta que para ahorrar electricidad y aumentar el rendimiento, se tiene que mejorar el sistema de molienda en general.
- Se exhorta continuar con estudios de investigación que permitan identificar las causas etiológicas del inadecuado funcionamiento de los parámetros eléctricos, esto permitirá organizar, identificar y registrar todos los factores a nivel más profundo y así poder brindar soluciones más efectivas en la reparación eléctrica de los molinos de bolas en la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WHITE, G. *Introducción al análisis de vibraciones*. Online. 1°. ed. U.S.A: Azima DLI, 2010. ISBN: 781-935-0179 www.AzimaDLI.com
2. CÁRCEL, F. Historical evolution of industrial maintenance in relation to knowledge management. *Dyna (Spain)*, 2016, 91(6), 591–596. ISSN: 590-595 DOI 10.6036/7890.
3. HERNÁNDEZ, E, OLIVO, D. and CARRILLO, C. Estudio de la eficacia de la toma de medidas de vibraciones mecánicas sobre superficies irregulares y no rígidas. *Investigación y Desarrollo*. June 2020, 1(1), 93–98. ISSN: 1390-7042 <https://orcid.org/0000-0001-7577-7584>
4. GUERRA, E and MONTES, A. Relación entre la productividad, el mantenimiento y el reemplazo del equipamiento minero en la gran minería. *Boletín de Ciencias de la Tierra*. Online. 1 January 2019. No. 45, p. 14–21. ISSN: 0120-3630 [Accessed 11 November 2023]. DOI 10.15446/rbct.n45.68711.
5. HERRERA, J. *Introducción al mantenimiento minero*. Online. 1°. ed. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, 2022. ISBN: 10485 [Accessed 11 November 2023].
6. ALPA POWDER. Medidas de mantenimiento del molino de bolas. *Noticias de la Industria*. Online. 22 December 2021. [Accessed 11 November 2023]. Available from: <https://www.alpapowder.com/es/115413/>
7. RIVERA, I., QUINTERO, F. and BUSTAMANTE, M. Wear analysis of steel grinding media in a balls mill of the Argos S.A company. *Prospect*. Online. 12 May 2012. Vol. 10, no. 1, p. 108–112. ISSN: 0818 4215 [Accessed 11 November 2023]. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4212405.pdf>
8. RAMÍREZ, J., SARMIENTO, H. and LÓPEZ, J. Diagnóstico de fallas en procesos industriales mediante inteligencia artificial Fault diagnosis in industrial processes through artificial intelligence Contenido. Online. 22 February 2018. Vol. 39,

p. 12–28. ISSN: 0798 1015 [Accessed 11 November 2023]. Available from:
<https://www.revistaespacios.com/a18v39n24/a18v39n24p12.pdf>

9. INTERNATIONAL STANDARD ISO 10816-3. *Norma ISO 10816* Online. 1998.
[Accessed 12 November 2023]. Available from:
<https://www.rodsprex.com/assets/img/services/servbenf04.pdf>
10. VALENZUELA, P. *Análisis del consumo eléctrico y propuesta de medidas de eficiencia energética en procesos de minería en Chile*. Online. Tesis (Magister en Economía Energética). Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.
[Accessed 11 November 2023]. Available from:
<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46138/3560900259712UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
11. FIGUEROA, V. *Propuesta de un Plan de Mantenimiento basado en la metodología RCM II para los equipos críticos del proceso minero de la Compañía Minera Cerro Negro*. Online. Tesis (Título de Ingeniero Civil Industrial). Chile : Universidad de Valparaíso, 2018. [Accessed 11 November 2023]. Available from:
<http://repositoriobibliotecas.uv.cl/handle/uvsc1/865>
12. ZAMORA, I. *Diseño de un Plan de Mantenimiento para un molino de bolas de la Empresa Compañía Minera Cerro Negro S.A.* Online. Tesis (Título de Ingeniero Civil Mecánico). Chile : Pontificia Universidad Católica Valparaíso, 2018.
[Accessed 12 November 2023]. Available from: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Txt-9500/UCC9690_01.pdf
13. CADMEN, M. *Análisis y detección de fallas múltiples en el circuito de molienda de cemento de la planta industrial Guapán*. Online. Tesis (Magister en Control y Automatización Industriales). Ecuador : Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
[Accessed 11 November 2023]. Available from:
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14384/1/UPS-CT007055.pdf>
14. GAVIDIA, J. and RODRÍGUEZ, R. *Implementación de un proceso de ACR, utilizando análisis vibracional, para asegurar la operatividad de los molinos desmeduladores de bagazo de caña de azúcar de una empresa papelera*. Online. Tesis (Título de Mecánico Electricista). Perú: Universidad César Vallejo, 2020.

[Accessed 11 November 2023]. Available from:

[https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/51061/Gavidia_MJL-Rodriguez_LRD %20- %20SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/51061/Gavidia_MJL-Rodriguez_LRD%20-%20SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

15. LÓPEZ, K and LÓPEZ, D. *Sistema de protección automatizado de un molino de caña basado en un análisis vibracional*. Online. Tesis (Título de Mecánico Electricista). Trujillo: Universidad César Vallejo, 2022. [Accessed 11 November 2023]. Available from: [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/95005/L %c3 %b3pez_AKK-L %c3 %b3pez_FD-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/95005/L%b3pez_AKK-L%b3pez_FD-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
16. NARVAEZ, J. *Análisis de fallas del molino de bolas 20´x30´ para propuesta de Plan de Mantenimiento preventivo en planta concentradora del Brocal*. Online. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2020. [Accessed 11 November 2023]. Available from: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6855/T010_45476152_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
17. VALERIN, D. *Análisis del índice de consumo eléctrico para incrementar la eficiencia en Molino Don Julio*. Online. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico Electricista). Perú : Universidad César Vallejo, 2018. [Accessed 11 November 2023]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/28307>
18. ANDRADE, R and RAMOS, M. *Propuesta de la metodología RCM en la gestión de mantenimiento que permita mejorar la disponibilidad de la Línea de Chancado Primario en una empresa minera*. Online. Tesis (Título de Ingeniero Industrial). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2023. [Accessed 11 November 2023]. Available from: [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/655036/Andrade Q_R.pdf?sequence=3](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/655036/Andrade_Q_R.pdf?sequence=3)
19. ANDREA, E. Molienda. In: Online. 1.ºed. España: Universidad de Cantabria, 2015. p. 1–55. [Accessed 11 November 2023]. Available from: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8._molienda.pdf

20. GRUPO WEG. *Motores de inducción trifásicos m mining* Online. Brasil, 2018.
[Accessed 11 November 2023]. Available from:
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h76/ha3/WEG-motores-de-induccion-trifasicos-linea-m-mining-50078366-catalogo-espanol.pdf>
21. TROCEL, D. Análisis de vibraciones en motores eléctricos de inducción. *Power-MI*. 20 November 2019.
22. TORRES, R. and BATISTA, C. Análisis vibrodinámico de motores eléctricos
Vibrational and dynamic analysis of electric motors. *Ingeniería Mecánica*. Online. 2010. Vol. 13, no. 1, p. 9–18. [Accessed 11 November 2023]. Available from:
<http://scielo.sld.cu/pdf/im/v13n1/im02110.pdf>
23. GRUPO SKF. *SKF Machine Condition Advisor CMAS 100- SL. Machine monitoring, made simple* Online. California, 2008. [Accessed 11 November 2023]. Available from: <https://docs.rs-online.com/14c1/A700000006637740.pdf>
24. VIVEROS, P, STEGMAIER, R, KRISTJANPOLLER, F, BARBERA, L and CRESPO, A. Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo Proposal of a maintenance management model and its main support tools. *Revista chilena de ingeniería*. Online. 13 November 2013. Vol. 21, no. 1, p. 125–138, ISSN: 0718-3305.[Accessed 11 November 2023]. Available from: <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v21n1/art11.pdf>
25. REY, F. Elaboración y optimización de un plan de mantenimiento preventivo. Online. December 2014. Vol. 308, p. 30–41. [Accessed 11 November 2023]. ISSN 0040-1838. <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/98/3064/a3064.pdf>
26. CONSEJO DE COMPETENCIAS MINERAS. *Procesos de mantenimiento* Online. Chile, 2017. [Accessed 11 November 2023]. Available from: https://www.ccm.cl/wp-content/uploads/2017/04/4.-CCM2017_Cuadernillo_mantenimiento-2.pdf
27. RIQUELME, M. *Equipos LHD en minería subterránea: características de diseño, selección y optimización operativa* Online. 2022. [Accessed 11 November 2023].

Available from: https://kupdf.net/download/materialdeestudioparteidiap1-80-pdf_62f4a1f0e2b6f55b04d3b180_pdf

28. BARRIOS, J. and CALDERÓN, S. Análisis y diagnóstico de los tipos de mantenimiento en la pequeña y gran minería aurífera en la subregión del Bajo Cauca, Antioquia. *Metalnova*. Online. 2018. Vol. 1, no. 1, p. 1–17. ISSN: 2619-2357 [Accessed 11 November 2023]. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/metalnova/article/view/2140/2439>
29. OLARTE, W, BOTERO, M and CAÑON, B. Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia et Technica Año XVI*. Online. 2010. Vol. 45, no. 1. ISSN: 0122-1701 [Accessed 11 November 2023]. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4546591.pdf>
30. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (NC). *Vibraciones y choque-Vocabulario* Online. Cuba, 2007. [Accessed 11 November 2023]. Available from: [https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA %20UNIVERSITARIA %20DEL %20ISDI/COLECCION %20DIGITAL %20DE %20NORMAS %20CUBANAS/2007/NC %20ISO %202041 %20 %20a2007 %20 %2082p %20prt.pdf](https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA%20UNIVERSITARIA%20DEL%20ISDI/COLECCION%20DIGITAL%20DE%20NORMAS%20CUBANAS/2007/NC%20ISO%202041%20%20a2007%20%2082p%20prt.pdf)
31. ROYO, J, RABANAQUE, G. and TORRES, F. Análisis de vibraciones e interpretación de datos. Online. 2018. Vol. 1, no. 136, p. 39–48. ISSN: 0214-4344 [Accessed 12 November 2023]. Available from: <http://www.todosensores.es/articulos/vibraciones.pdf>
32. RODRÍGUEZ, M. Biblioteca Virtual. *Análisis Modal Operacional: Teoría y Práctica*. Online. 13 March 2019. [Accessed 11 November 2023]. ISBN: 41092 Available from: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3828/direccion/>
33. MAIGUA, C, QUITIAQUEZ, W, SIMBAÑA, I, QUITIAQUEZ, P, TOAPANTA, F and ISAZA, C. Diseño de un Sistema de Monitoreo de Vibraciones Mecánicas en Generadores Hidroeléctricos de Media Potencia. *Revista Técnica “energía.”* Online. 30 July 2020. Vol. 17, no. 1, p. 92–102. ISSN: 2602-8492 [Accessed 11 November 2023]. DOI 10.37116/revistaenergia.v17.n1.2020.397.

34. MÁQUINAS y accionamientos eléctricos (3M4). *Introducción a mediciones eléctricas e instrumentos analógicos*. ISBN: 210 297. Online. 2018. [Accessed 11 November 2023].
http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/maquinasyaccionamientos/subir/1.Teoria_apuntes_de_catedra/mae_2019_apunte_catedra1_instrumentos_analogicos.pdf
35. PENKOVA, M. Mantenimiento y análisis de vibraciones. *Ciencia y Sociedad*. Online. 2017. Vol. 32, no. 4, p. 668–678. ISSN: 0378-7680 [Accessed 4 December 2023]. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/870/87032407.pdf>
36. PÉREZ, F. *Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial*. Online. 1°.ed. Colombia : Ediciones Universidad Santo Tomás, 2021. [Accessed 11 November 2023]. ISBN 978-958-8477-92-3.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33276/9789588477923.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
37. CASTILLO, J. and MARRUFO, E. Motores eléctricos. In : *Equipos Electrónicos de Consumo-Grado Medio*. Online. Mc Graw Hill, 2013. [Accessed 11 November 2023]. ISBN 84-481-7310-4. Available from: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/CAPÍTULO/8448173104.pdf>
38. FUNDACIÓN RED DE ENERGÍA-BUN-CA. *Motores Eléctricos, Manual Técnico*. Online. 1°.ed. San José, Costa Rica: Biomass Users Network (BUN-CA), 2009. ISBN 9789968904360. Available from: www.kikeytetey.com
39. BARRÓN, D, GARCÍA, N, MÉNDEZ, P and LUNA, M. *Vigilancia tecnológica y análisis de trayectorias tecnológicas: molinos de bolas para operaciones mineras*. Online. 1°.ed. México : Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. , 2016. [Accessed 11 November 2023]. ISBN 9786079699420. Available from: <https://docplayer.es/216304395-Vigilancia-tecnologica-y-analisis-de-trayectorias-tecnologicas-molinos-de-bolas-para-operaciones-mineras.html>
40. ROMERO, C., CARRANZA, Y. and QUINTERO, H. Modelado del calentamiento de los Motores de Combustión. *Scientia et Technica Año XIII*. Online. December 2007. Vol. 1, no. 37. p. 249-254. ISSN: 0122-1701

[Accessed 11 November 2023]. Available from:

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4784272.pdf>

41. HERNÁNDEZ, R. and MENDOZA, C. *Metodología de la investigación: Ruta cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: Mc Graw Hill, 2018. ISBN: 978-1-4562-6096-5
42. YARLEQUÉ, L., JAVIER, L., MONROE, J. and NUÑEZ, E. *Investigación en Educación y Ciencias Sociales*. 1°.ed. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2007. ISBN: 4232-64578
43. ÑAUPAS, H., VALDIVIA, M., PALACIOS, J. and ROMERO, H. *Metodología de la investigación*. 5°. ed. Colombia: Ediciones de la U, 2018. ISBN 978-958-762-877-7.
http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/MetodologiaInvestigacionNaupas.pdf
44. GRUPO SKF. *Rodamientos Online*. EE. UU., 2015. [Accessed 11 November 2023].
https://www.tecnifajas.com/media_tecnifajas/uploads/pdf_catalogo/10000_2-es---rolling-bearings.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Dimensiones	Metodología
<p>Problema general ¿Cómo impactan las vibraciones con los modos de falla de difícil detección del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023?</p>	<p>Objetivo general Evaluar el impacto de las vibraciones en los modos de falla de difícil detección del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.</p>	<p>Hipótesis general Se plantea que la afectación de las vibraciones está vinculada con la aparición de modos de falla de difícil detección en el molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.</p>	<p>Variable Condición de un molino de bolas</p> <p>Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis vibracional • Mediciones eléctricas 	<p>Tipo Aplicado</p> <p>Diseño No experimental, transversal descriptivo</p> <p>Nivel Descriptivo</p> <p>Población 06 molinos de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., 2023.</p> <p>muestra 01 molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., 2023.</p> <p>Muestreo Probabilístico</p> <p>Técnica Registro de datos</p> <p>Instrumento Ficha de registro</p> <p>Procesamiento de datos Estadística- software SPSS 28</p>
<p>Problemas específicos ¿Identificar las vibraciones y resonancias anormales, que puedan indicar posibles fallas o desgaste en sus componentes eléctricos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023?</p>	<p>Objetivos específicos Se identifica las vibraciones y resonancias anormales, que puedan indicar posibles fallas o desgaste en sus componentes de difícil detección del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.</p>	<p>Hipótesis específicos Se plantea que mediante la implementación de técnicas de monitoreo y análisis de vibraciones, es posible identificar y evaluar de manera efectiva las vibraciones y resonancias anormales, lo cual permitirá detectar posibles fallas o desgaste en sus componentes de difícil detección en el molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.</p>		
<p>¿Afectan las vibraciones en la medición de parámetros eléctricos, como corriente, voltaje, en el sistema eléctrico general y en los componentes específicos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023?</p>	<p>Determinar si las vibraciones afectan la medición de parámetros eléctricos, como corriente, voltaje o consumo de energía, tanto en el sistema eléctrico general como en los componentes específicos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.</p>	<p>Se postula que las vibraciones afectan la medición de parámetros eléctricos, como corriente, voltaje o consumo de energía, tanto en el sistema eléctrico general como en los componentes específicos del molino de bolas de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha S.A.A., en el 2023.</p>		

Anexo 2. Base de datos de las inspecciones predictivas del Molino N.º 2 desde el 01 de noviembre hasta el 4 de marzo del 2023.

PLACA DEL MOTOR		PUNTOS DE VIBRACION		NIVELES MAXIMOS DE VIBRACION																Clasificación de máquinas para medición de aceleración en envuelta (envolvente)																						
MARCA	WEG			mm/seg - RMS				SFK Machine Condition Advisor CMAS100-LS				NORMAL								clase	OK	Alerta	Peligro																			
SERIE	127488 03 04			potencia minima	>15 Kw	20 RPM - 15000 RPM		OPERACION SIN RESTRICCION								CL1	0-1 gE	1-2 gE	mas 2 gE																							
POTENCIA (KW/HP)	(...../200)	CL3		CL2		CL1		OPERACION CON RESTRICCION								CL2	0-2 gE	2-4 gE	mas 4 gE																							
VOLTAJE	440	1800 - 3600 rpm		500 - 1800 rpm		< 500 rpm		ACCION								CL3	0-4 gE	4-10 gE	mas 10 gE																							
AMPERAJE	280	Ø eje= 2cm - 15cm		Ø eje= 5cm - 30cm		Ø eje= 20cm - 50cm		CONDICION																																		
RPM	588	CLASES		CLASE IV		CLASE III		CLASE II		CLASE I																																
FACTOR / POTENCIA	1.15	estado		RIGIDO	FLEXIBLE	RIGIDO	FLEXIBLE	RIGIDO	FLEXIBLE	RIGIDO	FLEXIBLE	RIGIDO	FLEXIBLE																													
FACTOR / SERVICIO	MAF 5812	A		0-1.4	0-2.3	0-2.3	0-3.5	0-1.4	0-2.3	0-2.3	0-3.5																															
MODELO		B		1.5-2.8	2.4-4.5	2.4-4.5	3.6-7.1	1.5-2.8	2.4-4.5	2.4-4.5	3.6-7.1																															
MTR		C		2.9-4.5	4.6-7.1	4.6-7.1	7.2-11	2.9-4.5	4.6-7.1	4.6-7.1	7.2-11																															
FRAME		D		4.6-mas	7.2-mas	7.2-mas	12-mas	4.6-mas	7.2-mas	7.2-mas	12-mas																															
FECHA FABRICACION		potencia		>15 kw				15kw<P≤ 300kw				300kw<P<50Mw																														
MOLINO 02 HARDINGE 8" X 5"																																										
RIGIDO	FLEXIBLE	FECHA		01-nov	08-nov	15-nov	22-nov	29-nov	06-dic	13-dic	20-dic	27-dic	01-ene	08-ene	15-ene	22-ene	29-nov	22-ene	06-feb	12-feb	19-feb	26-feb	04-mar																			
Diametro del eje		cm		HORA		10:30 a.m.	11:30 a.m.	12:30 p.m.	01:30 p.m.	02:30 p.m.	03:30 p.m.	04:30 p.m.	05:30 p.m.	06:30 p.m.	10:30 a.m.	11:30 a.m.	11:15 a.m.	01:30 p.m.	02:30 p.m.	10:30 a.m.	11:00 a.m.	02:57 p.m.	06:40 p.m.	04:00 p.m.	05:00 p.m.																	
		Tonelada		20Tn	19Tn	20Tn	21Tn	20Tn	18Tn	20Tn	18Tn	20Tn	19Tn	20Tn	21Tn	20Tn	18Tn	20Tn	19.1Tn	22Tn	20Tn	19Tn	18.1Tn																			
CONSUMO DE CORRIENTE		L1	235.0	194.0	210.0	195.0	232.0	249.0	240.0	198.0	210.0	195.0	209.0	261.0	260.7	197.0	260.7	249.3	246.3	185.6	188.8	211.0	243.2																			
		L2	232.0	192.0	220.0	188.0	230.0	280.0	235.0	199.0	215.0	188.0	210.0	260.0	260.2	198.0	260.2	246.3	185.6	188.8	211.0	243.9																				
		L3	236.0	189.0	219.0	192.0	229.0	220.0	236.0	200.0	213.0	192.0	223.0	261.0	258.3	195.0	258.3	249.6	185.3	185.8	210.0	245.4																				
VOLTAJE DE LINEA		L1-L2	450.0	443.0	449.7	449.7	449.0	449.0	449.0	448.0	448.0	429.0	449.0	432.0	429.0	449.0	429.3	432.6	430.0	444.0	438.0	431.0																				
		L2-L3	445.0	442.0	448.0	448.0	448.0	448.0	448.0	448.0	437.0	448.0	448.0	432.0	427.0	448.0	427.6	431.3	431.0	441.0	437.0	430.0																				
		L1-L3	455.0	444.0	449.0	445.5	444.0	445.5	447.0	435.0	447.0	432.0	445.5	433.0	432.0	445.5	432.3	434.7	432.0	438.0	436.0	434.0																				
ENVOLVENTE		L.V.	0.2	0.9	0.61	0.46	0.2	1	0.65	0.55	0.61	0.46	1	0.46	0.65	0.55	0.56	0.8	0.2	0.9	0.65	0.55	0.61	0.46	0.45	0.9	0.2	0.9	0.61	0.46	0.2	0.9	0.61	0.46	0.65	0.55	0.89	0.68	0.56	1.2	0.4	0.54
		L.A.	1	0.6	0.45	0.61	0.1	0.5	0.82	0.66	0.45	0.61	0.5	0.43	0.82	0.66	0.7	0.4	1	0.6	0.82	0.66	0.45	0.61	0.6	0.23	1	0.6	0.45	0.61	1	0.6	0.45	0.61	0.82	0.66	0.81	1.07	2.03	0.68	2.08	0.65
			0.2	0.4	0.7	0.97	0.5	0.8	0.9	0.9	0.7	0.97	0.6	0.23	0.9	0.9	1	0.9	0.2	0.4	0.9	0.9	0.7	0.97	0.7	1.3	0.2	0.4	0.7	0.97	0.2	0.4	0.7	0.97	0.9	0.9	0.88	1.11	0.9	0.75	0.72	0.85
VIBRACIONES	LADO VENTILADOR	1V	2.5	2.5	2.6	2.5	2.6	2.8	2.6	2.5	2.9	3.0	3.1	3.0	3.2	2.8	2.9	2.7	3	3	2.9	2.7																				
		1H	2.3	2.4	2.6	2.0	2.6	2.9	2.4	2.6	2.6	2.8	2.7	2.8	2.7	2.8	2.7	3.7	2.7	4.2	3.2	2.7																				
		1A	2.3	2.1	2.4	2.3	2.4	2.6	2.4	2.5	2.4	2.7	2.4	2.6	2.4	2.2	2.2	3.2	3.5	4.1	4.2	3.4																				
LADO ACOPLAMIENTO	2V	2.4	2.5	2.6	2.5	2.6	2.8	2.9	3.0	3.1	3.0	3.2	3.0	2.8	2.7	2.8	3	4.5	5.3	4.2	3.7																					
	2H	2.6	2.8	3.0	2.8	3.0	3.1	3.0	2.9	3.0	3.0	3.1	3.0	2.9	3.0	2.9	4.7	6.1	5.6	5.2	5																					
	2A	2.0	2.2	2.1	2.2	2.1	2.3	2.1	2.3	2.3	2.5	2.0	2.3	1.9	1.8	1.9	3	3.5	3.7	3.9	3.6																					
TEMPERATURA	LATERAL IZQUIERDO	L.V.	143	145	133	106	104	109	105	101	103	100	89	64	82	66	72	76	85	98.8	89	46.7																				
		C	128	127	131	113	112.3	110	106	110	99	98	90	110.2	110	100	110	106	113	84.1	90	45.8																				
		L.A.	110	59	124	103	106	105	100	102	102	89	88	84	90	60	64	42.1	40.1	64.3	98	45.4																				
	LATERAL DERECHO	L.V.	135	140	142	110	102	103	108	111	110	109	100	65	74	67	94	41.8	43	110.9	109	43.3																				
		C	122	130	129	109	110	98	99	100	108	99	88	98	114	110	114	103	109.8	110.7	95	67.1																				
		L.A.	111	125	122	108	109	99	101	102	107	87	85	85	84	67.6	84	41.2	50.6	73.7	98	45.2																				
HOROMETRO										55313										55544				56214																		
RODAMIENTO	LATERAL IZQUIERDO	L.V.	153	155	143	116	114	119	115	111	113	110	99	74	92	76	82	86	95	108.8	99	56.7																				
		L.A.	120	69	134	113	116	115	110	112	112	99	98	94	100	70	74	52.1	50.1	74.3	108	55.4																				
	LATERAL DERECHO	L.V.	145	150	152	120	112	113	118	121	120	119	110	75	84	77	104	51.8	53	120.9	119	53.3																				
		L.A.	121	135	132	118	119	109	111	112	117	97	95	95	94	77.6	94	51.2	60.6	83.7	108	55.2																				

Anexo 3. Fragmento de base de datos general de inspecciones de vibraciones predictivas de los molinos de la Cía. Minera Nexa Resources Atacocha

S.A.A...

14																																															
15	EQUIPO	MOLINO 2										MOLINO 9										MOLINO 4																									
16		2										1										1																									
17	Fecha	GE	1A	GE	2H	GE	2V	GE	2A	GE	T1	T2	T3	1H	GE	1V	GE	1A	GE	2H	GE	2V	GE	2A	GE	T1	T2	T3	1H	GE	1V	GE	1A	GE	2H	GE	2V	GE	2A	GE	T1	T2	T3				
4194	16/01/2022	1.15	4.9	0.59	3.8	2.21	4.2	0.83	5.1	0.73	103	86	86	6.9	2.55	4.5	3.35	4.2	1.56	5.1	2.11	2.9	1.21	4.5	1.58	93	25	56	1.9	1.11	2.4	0.35	1.6	0.21	2.1	0.33	3.2	0.43	1.4	0.29	122						
4195	17/01/2022	1.08	4.8	1.48	3.9	2.36	4.1	0.78	4.9	0.65	105	88	87	7.1	2.62	4.2	3.21	4.1	1.51	5.2	2.18	3.1	1.41	4.4	1.68	94	27	60	1.8	1.09	2.5	0.39	1.7	0.28	2.2	0.36	3.1	0.41	1.6	0.34	127						
4196	18/01/2022	1.12	4.6	1.36	3.8	2.26	3.9	0.58	5.1	0.78	103	86	88	6.9	2.51	4.1	3.19	3.9	1.47	5.1	2.15	3.1	1.36	4.2	1.62	95	27	61	1.6	1.02	2.6	0.41	1.8	0.31	2.1	0.32	3.2	0.45	1.7	0.35	125						
4197	19/01/2022	1.07	4.6	1.15	3.6	1.8	5.3	0.68	4.6	1.61	108	91	92	6.7	2.52	6.4	2.37	4.4	1.54	5.8	1.06	2.6	1.87	3.8	2.02	95	27	59	2.2	0.28	2.7	0.34	1.9	0.78	2.6	0.3	3.5	0.99	1.9	0.3	127						
4198	20/01/2022	0.64	4.6	1.37	3.5	1.47	5.1	0.63	4.4	1.88	111	95	106	6.6	2.87	5.4	2.47	3.8	1.92	5.6	2.73	2.6	2.14	3.6	2.06	95	27	58	2	0.4	3	0.44	1.9	0.27	2.8	0.34	3.8	0.55	1.9	0.29	128						
4199	21/01/2022	0.71	4.4	1.24	3.6	2.14	5.4	0.67	5.2	1.56	105	90	101	7.6	1.84	5.5	3.29	4.2	1.97	5.5	0.44	2.7	2.25	3.5	1.69	96	27	64	1.8	0.28	2.4	0.34	1.6	0.37	2.3	0.34	3.2	0.47	1.5	0.43	129						
4200	22/01/2022	0.77	4.6	1.19	3.8	3.09	5.1	0.71	4.9	1.72	109	95	131	7.2	2.55	6.4	2.1	4.4	1.81	5.9	0.86	3.4	2.63	4.2	2.16	98	28	63	1.8	0.53	2.4	0.36	1.5	0.64	2.2	0.6	3	0.41	1.5	0.24	127						
4201	23/01/2022	0.57	5	1.47	3.8	3.8	5	0.62	5.4	1.92	106	92	128	6.8	1.87	5.5	0.79	4	2.04	25.9	0.74	2.7	1.94	3.8	2.01	97	28	60	1.8	1.15	2.4	0.37	1.4	0.35	2.3	1.16	2.9	0.5	1.5	0.23	129						
4202	24/01/2022	0.68	5.3	1.38	3.8	2.75	4.8	0.83	5.2	1.35	103	88	110	7.1	1.94	6.7	0.86	4	2.01	5.8	2.45	2.6	2.4	3.6	2.14	96	27	58	1.7	0.63	2.4	0.41	1.7	0.25	2.5	0.32	3.2	0.52	1.5	0.38	127						
4203	25/01/2022	0.81	5.7	1.34	3.8	2.59	5.1	1.07	5.4	1.67	103	88	120	6	1.94	6.2	0.98	3.3	1.58	5.2	1.97	2.2	1.97	3.1	1.68	95	26	57	1.9	0.4	2.6	0.44	1.6	0.58	2.5	0.71	3.1	0.54	1.5	0.23	128						
4204	26/01/2022																																														
4205	27/01/2022																																														
4206	28/01/2022																																														
4207	29/01/2022																																														
4208	30/01/2022																																														
4209	31/01/2022																																														
4210	01/02/2022																																														
4211	02/02/2022	0.6	5.2	1.34	3.6	2.48	4.9	0.83	5.2	1.72	105	82	90	5.5	2.07	6.4	0.37	2.8	2.37	4.3	0.43	1.7	0.85	2.8	1.28	87	32	55	1.4	0.44	1.8	0.36	1.5	0	2.2	0.26	3.2	0.44	1.5	0.24	127						
4212	03/02/2022	0.68	5.5	1.18	4	1.7	4.8	0.85	5.9	1.2	112	91	57	5.5	2.13	4.2	2.15	2.6	2.86	4.6	0.49	1.7	0.9	2.9	1.6	84	36	57	1.3	0.45	1.6	0.28	1.4	0.3	2.2	0.32	3.1	0.51	1.4	0.27	129						
4213	04/02/2022	0.54	5.7	1.22	4.1	1.34	5	0.71	6.3	1.56	109	87	99	5.3	2.68	5.6	0.28	3	2.24	4.1	0.43	1.8	0.83	2.9	1.64	85	33	54	1.2	0.24	1.7	0.25	1.2	0.25	2.2	1.55	3	0.39	1.1	0.25	71						
4214	05/02/2022	0.63	7	1.23	4.5	1.54	4.9	0.55	6.5	1.51	109	88	100	5	3.34	4.8	0.37	2.9	2.79	4.5	0.48	1.9	1.29	2.9	1.7	87	33	55	1.5	0.28	1.8	0.28	1.3	0.44	2.3	0.4	3	0.42	1.4	0.35	112						
4215	06/02/2022	1.22	8.6	0.98	5	1.54	4.1	1.78	7.1	1.14	110	89	99	4.8	2.36	4.1	0.81	2.6	1.6	4.4	0.64	1.9	1.32	2.9	1.67	87	34	56	1.5	0.33	1.9	0.45	1.4	0.28	2.2	0.51	3	0.4	1.2	0.24	115						
4216	07/02/2022	0.51	7.7	1.29	4.8	3.09	4.6	1.27	7.5	1.34	109	89	99	6	2.56	6.2	0.37	3	2.25	5.1	0.78	2	1.63	3	1.49	86	33	55	1.5	0.24	1.8	0.31	1.5	0.27	2.3	0.3	3	0.37	1.5	0.21	114						
4217	08/02/2022	1.11	7.5	1.36	5	2.35	4.5	0.97	7.9	1.37	94	79	101	5	2.59	6.8	0.47	2.9	2.58	4.8	0.46	1.8	1.5	2.7	1.49	81	31	54	1.3	0.24	1.7	0.34	1.2	1.03	2.1	0.37	2.9	0.5	1.1	0.25	104						

Anexo 4. *Características del Molino de bolas N.º 2.*

Placa de identificación del molino N.º 2.



Identificación del molino N.º 2, tomado como muestra para el estudio.



Anexo 5. *Inspecciones predictivas del Molino N.º 2*

Toma de datos vibracionales, usando el medidor de vibraciones tipo pluma CMAS 100 SKF



Ubicar el instrumento en el punto de medición correcto en la maquina



Toma de lectura de vibración, en puntos críticos o de mayor vibración.



Anexo 6. *Residuos de aceite en el visor parte de acople en el motor*



Anexo 7. Modelo de procedimiento operacional para la toma de datos de parámetros eléctricos.

CONFIPETROL		Código	PE1022872AT-OAM-MDD1-P-32
PROCEDIMIENTO OPERACIONAL		Revisión	1
MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS		Fecha	18/12/2021
		Área	Mantenimiento Eléctrico
		Páginas	2
1. PERSONAL			
Supervisor Operativo / Supervisor HSEQ / Técnico Electricista			
2. CONDICIONES NECESARIAS			
EPP NECESARIOS PARA ACTIVIDAD		RIESGOS CRÍTICOS	RESTRICCIONES
			<ul style="list-style-type: none"> No se puede iniciar si no se han ejecutado el llenado de la herramienta de gestión a utilizar en la actividad. El personal debe contar con la capacitación para realizar los trabajos de riesgos críticos. No se realizará la actividad si no se cuenta con la autorización de trabajo liberada o las habilitaciones correspondientes. No se ejecutará la actividad si no se cuenta con todos los EPPs descritos disponibles y en buen estado. No se cuenta con la calibración vigente de los instrumentos. Uso obligatorio de la mascarilla (tipo N95/KN95 o comunitaria) cuando no haya presencia del polvo, humos metálicos o gases (en este caso usar el respirador de media cara con filtros para partículas o gases).
3. EQUIPOS / HERRAMIENTAS / MATERIALES			
3.1 EQUIPOS e INSTRUMENTOS		3.2 HERRAMIENTAS	3.3 MATERIALES
Pinza Amperimétrica, cámara termográfica, pirómetro.		Destornilladores dieléctricos 1000V, alicates dieléctricos 1000V, cuchilla de electricista.	
4. PROCEDIMIENTO			
	4.1. Coordinación de trabajos a realizar: *Coordinación con el supervisor de la actividad a realizar. *Entrega y recepción de la OT *Charla de 5 minutos. Verificar que la orden de trabajo este bien especificada y de facil entendimiento. Verificar que la orden de trabajo tenga la firma del supervisor. Virus del COVID-19 / Cumplimiento del Plan para la prevención y vigilancia frente al COVID-19, Uso de mascarilla y respetar distanciamiento mínimo obligatorio		
	4.2. Llenado de documentos y verificación. *Realizar la inspeccion del area de trabajo mediante la tecnica de las 6A. *Realizar la inspeccion de los EPPs, herramientas, equipos. *Realizar el llenado de las herramientas de gestion (IPERC, PETAR, CHECK LIST) segun corresponda. *Delimitar el área de trabajo. Verificar que el PETAR se encuentre con todas las firmas de autorización del área. Verificar que el personal cuente con su IPERC para la actividad. Verificar que los tecnicos cuenten con la autorización correspondiente para el trabajo. Verificar el correcto llenado de los check list. Herramientas manuales / Verificar que las herramientas estándares cuenten con el color de la cinta del mes. Virus del COVID-19 / Cumplimiento del Plan para la prevención y vigilancia frente al COVID-19, Uso de mascarilla y respetar distanciamiento mínimo obligatorio		
	4.3. Medición de parámetros eléctricos. *Aperturar el tablero eléctrico. *Realizar la medición de parámetros electricos (tension, corriente y temperatura). *Rellenar los datos en el formato de parámetros eléctricos. *Cerrar el tablero eléctrico. Herramientas manuales / Verificar que las herramientas estándares cuenten con el color de la cinta del mes. Instrumentos de medición / Verificar que la calibracion de los intrumentos esten vigentes. EPPs especificos / Hacer uso de los guantes dieléctricos 500V y careta facial. Ergonomia/Postural/ Realizar pausas activas periodicamente, trabajo coordinado, posicionarse correctamente. Desnivel/ Caidas al mismo nivel/, verificar que el área este libre de obstáculos en el piso. Contar con permiso de trabajo con presencia de energia. Virus del COVID-19 / Cumplimiento del Plan para la prevención y vigilancia frente al COVID-19, Uso de mascarilla y respetar distanciamiento mínimo obligatorio		
	4.4 Orden y limpieza: *Realizar orden y limpieza antes, durante y despues del trabajo. Levantamiento de peso manual / Trabajo coordinado no exceder los 25 Kg por persona, posicionarse correctamente al momento de levantar la carga. Desnivel/ Caidas al mismo nivel/, verificar que el área este libre de obstáculos en el piso. Ergonomia/Postural/ Realizar pausas activas periodicamente, trabajo coordinado, posicionarse correctamente. Superficies cortantes / Guardas de seguridad en buen estado, uso de guantes de hyflex. Virus del COVID-19 / Cumplimiento del Plan para la prevención y vigilancia frente al COVID-19, Uso de mascarilla y respetar distanciamiento mínimo obligatorio		
5. RESULTADO ESPERADO			
<ul style="list-style-type: none"> Que la medición de parámetros eléctricos en los tableros arrancadores se realicen sin ningun incidente y/o accidente. Realizar todas las tareas de acuerdo a los estándares de seguridad. Velar por el cumplimiento del presente PETS en las operaciones. 			
6. ACCIÓN INMEDIATA PARA CORRECCIÓN DE ANOMALÍAS DE PROCESO:			
ANOMALIAS	POSIBLES CAUSAS		ACCIONES
No se cuente con los EPPs especificos (guantes dieléctrico, careta facial)	No reportar oportunamente el mal estado o la falta de los EPPs especificos.		Realizar el reporte del mal estado o falta de los EPPs especificos.
Instrumentos no se encuentren con el certificado de calibración vigente.	No realizar la inspeccion de los instrumentos, no reportar, no llevar el control de calibracion de instrumentos.		Reportar la vigencia de los certificados de calibracion, llevar un control de calibracion de los instrumentos.
ELABORADOR POR:	ELABORADOR POR:	REVISADO POR:	REVISADO POR:
Trabajador: Jonatan Avalo Rodríguez	Supervisor: Juan Quipe Choccelahua	Supervisor: Juan Quipe Choccelahua	Jefe HSEQ: Pilar Calderon Hermitaño
Líder de Servicio: Pedro Silvera Osorio			
Fecha: 18/12/2021	Fecha: 18/12/2021	Fecha: 18/12/2021	Fecha: 18/12/2021

Anexo 8. Informe de grado de similitud por Turnitin



Universidad Continental
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA
PLAN DE TESIS
ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLA DE DIFÍCIL DETECCIÓN CAUSADOS POR LA AFECTACIÓN DE LAS VIBRACIONES EN EL MOLINO DE LA CIA. MINERA NEXA RESOURCES ATACCOCHA S.A.A, EN EL AÑO 2023
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRICISTA
PRESENTADO POR:
BACH. PERCY ABRAHAM CARBAJAL VELI
ASESOR:
HUANCAYO - PERÚ
2023

AGRADECIMIENTOS

Agrociando a Dios por darme esta oportunidad y a la universidad por brindarme esta oportunidad académica y profesional.

16 %

1	repositorio.uncp.edu.pe	3 %
2	repositorio.continental...	2 %
3	repositorio.ucv.edu.pe	1 %
4	ageconsearch.umn.edu	1 %
5	repositorioacademico....	1 %
6	hdl.handle.net	1 %
7	power-mi.com	1 %
8	repositorio.usm.cl	1 %
9	Entregado a Instituto S...	<1 %