

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



TESIS

**Sistema de Sensado y Monitoreo online basado en
Análisis Vibracional para mejorar la Disponibilidad
de un Molino de Bolas en Compañía Minera.**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

Elaborado por:

Fernando Zenteno Paucar

[0009-0009-6370-9192](tel:0009-0009-6370-9192)

Asesor

Mg. Jorge Enrique Ortiz Porras

[0000-0002-9605-3670](tel:0000-0002-9605-3670)

LIMA – PERÚ

2023

Resumen

El presente estudio se centró en la disponibilidad del molino de bolas Kooper, que se utiliza en la mina para los procesos de producción. El objetivo es proponer un sistema de detección y monitoreo online basado en análisis vibracional para mejorar la disponibilidad del molino de bolas Kooper de 16.5 x 23 en una empresa minera. El enfoque de la investigación es cuantitativo, el nivel es descriptivo y correlacional, de diseño experimental y tipo pre experimental, donde se evaluó las situaciones mediante pruebas de pre y post test de la propuesta. Los resultados reflejados a través de los gráficos representativos en los diagramas de Pareto, Jack Knife y los inferenciales se obtuvieron una variación porcentual del 78.67% en el MTBF con los datos promedio de 36,38 a 65.00 h, una variación porcentual del 64,2% en el MTTR con los datos promedio de 1,34 a 0,17 h, una variación porcentual del 14,08% en la disponibilidad con los datos promedio de 86,39 a 98,55 %. Se concluye que la implementación del sistema de detección y monitoreo influye en la mejora de la disponibilidad del molino de bolas de cobre, reduciendo los costos de mantenimiento con un ahorro de 17 590 500 dólares americanos y un aumento en la producción de la planta.

Palabras clave: Sistema de sensado, análisis vibracional, disponibilidad de molino de bolas.

Abstract

This study is focused on the availability of the Kooper ball mill, which is used in the mine for production processes. The goal is to propose an online detection and monitoring system based on vibrational analysis to enhance the availability of the 16,5 x 23 Kooper ball mill in a mining company. The research approach is quantitative, the level is descriptive and correlational, and the design is experimental, of a pre-experimental type where situations were evaluated through pre and post-test trials of the proposal. The results, as reflected in representative graphs in Pareto, Jack Knife, and inferential diagrams, showed a percentage variation of 78,67% in MTBF with average data of 36.38 to 65 h, a percentage variation of 64,2% in MTTR with average data of 1,34 to 0,17 h, and a percentage variation of 14,08% in availability with average data of 86.39 to 98.55%. It is concluded that the implementation of the detection and monitoring system influences the improvement of the copper ball mill availability, reducing maintenance costs with a savings of US \$17,590,500 and an increase in plant production.

Keywords: Sensing system, vibrational analysis, ball mill availability.

Prólogo

El presente trabajo de investigación ofrece su contribución a la mejora de la disponibilidad de equipos, en este caso del molino Kooper 16,5x23, mediante un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional. Ello se llevó a cabo con la aplicación del sistema bajo procedimientos como la planificación, donde se revisa el diagnóstico del molino Kooper, formulación de los objetivos, la implementación donde se describe todo el proceso de sensado desde el análisis de criticidad, diagramas de Pareto, Jack knife, para luego evaluar la situación del monitoreo donde se evidencia mejoría en los indicadores tanto en el MTBF, MTTR y la disponibilidad, Por lo tanto, se ha organizado el proyecto del siguiente modo.

El primer capítulo, comprende la Introducción, se muestra el contexto, planteamiento y descripción de problema general, por el cual se evidenció en la planta que no se realizaba un adecuado proceso de mantenimiento preventivo y correctivo al molino Kooper, por lo cual dicha maquinaria tiende a bajar sus niveles de disponibilidad.

En el segundo capítulo se ofrece el marco teórico, antecedentes referenciales a la investigación tanto internacionales y nacionales, demostrando aquellos estudios previos relacionados al tema de investigación. Así mismo, se describe los principales fundamentos teóricos que avalan la investigación para términos que presentan varios significados cruciales para su progreso.

El tercer capítulo comprende el planteamiento de la hipótesis y operacionalización de variables, siendo éstas el sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional y la disponibilidad.

El cuarto capítulo describe la metodología de la investigación utilizada. Se formula el tipo y diseño del estudio de la unidad de análisis, el molino Kooper 16,5x23, y las técnicas de recolección de datos que facilitaron las observaciones para evaluar tanto el diagnóstico del molino antes y del después de la implementación.

El quinto capítulo comprende el desarrollo de la investigación, describiendo todo el procedimiento de la implementación del sistema bajo los objetivos trazados en la tesis. Se realizó un análisis de criticidad de los equipos en la planta, para luego identificar los puntos críticos del molino y proseguir con la instalación de los sensores para la evaluación del monitoreo donde se evidenció los espectros y tendencias que ayudan a evaluar y predecir posibles fallas futuras en el molino. Así mismo, se comparó el MTBF, MTTR, la disponibilidad del molino y la propuesta económica del sistema hacia la empresa. También se describe la contratación de las hipótesis formuladas por la investigación mediante el programa SPSS.

En el sexto capítulo se realiza el análisis y discusiones de los resultados obtenidos del capítulo anterior, comparando el objetivo general con estudios previos que fueron referentes al proyecto.

Por último, se detalla las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

Índice

Resumen	ii
Abstract	iii
Prólogo	iv
Índice	vi
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xii
CAPITULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	3
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Objetivo del estudio	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Antecedentes Investigativos	5
CAPITULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	16
2.1 Marco Teórico	16
2.1.1 Mantenimiento	16
2.1.2 Tipos de mantenimiento	17
2.1.3 Mantenimiento Predictivo apoyado en el Análisis Vibracional	18
2.1.4 Concepto de vibración	19
2.1.5 Historia del análisis de vibración en la maquinaria	20
2.1.6 Movimiento armónico simple	20
2.1.7 Análisis de frecuencia	21
2.1.8 Sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional	22

2.1.9	Espectros de vibración de maquinaria.....	25
2.1.10	Serie de Fourier.....	25
2.1.11	Transformada de Fourier.....	26
2.1.12	Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	27
2.1.13	Unidades de vibración.....	28
2.1.14	Efectos y consecuencias de la falla.....	30
2.1.15	Análisis fundamental de Causas de Fallas.....	31
2.1.16	Identificación de modo de fallas.....	31
2.1.17	Severidad de vibración según el tipo de máquina.....	39
2.1.18	Molino.....	41
2.1.19	Tipos de molinos.....	42
2.1.20	Tipos de fallas en el molino de bolas koppers 16.5 x 23.....	43
2.1.21	Desarrollo de Sistemas.....	47
2.1.22	Transductor.....	47
2.1.23	Sensores de vibración.....	48
2.1.24	Mediciones triaxiales.....	49
2.1.25	Sensores mono axiales.....	50
2.1.26	Sistema de sensado y monitoreo online.....	51
2.1.27	Software MHM.....	51
2.1.28	Analizador CSI 2140 Emerson.....	52
2.1.29	MOTORES PARA C.A. SÍNCRONOS.....	56
2.1.30	MOTORES PARA C.A. ASÍNCRONOS.....	56
2.1.31	Principales indicadores de mantenimiento.....	57

2.1.32	Disponibilidad.....	57
2.1.33	Indicadores de disponibilidad (MTBF y MTTR).....	58
2.1.34	Confiabilidad	59
2.1.35	Mantenimiento y RCM.....	60
2.1.36	Mantenimiento Centrado en la garantía de funcionamiento.....	60
2.1.37	Mantenimiento Productivo Total (TPM)	60
2.1.38	Diagrama de Pareto	61
2.1.39	Diagrama Jack Knife	62
2.2	Marco Conceptual	63
CAPÍTULO III HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES		64
3.1	HIPÓTESIS	64
3.1.1	Matriz de operacionalización	64
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		65
4.1	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	65
4.1.1	Enfoque.....	65
4.1.2	Tipo	65
4.1.3	Diseño.....	65
4.2	UNIDAD DE ANÁLISIS.....	66
4.3	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.....	66
4.3.1	La Población	66
4.3.2	La muestra	66
4.4	TÉCNICA E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	66

4.5	TÉCNICA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	67
4.6	ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	67
4.7	MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS.....	68
4.8	ASPECTOS ÉTICOS.....	68
CAPITULO V DESARROLLO DE LA TESIS		69
5.1	PLANIFICACIÓN.....	69
5.1.1	Matriz de Criticidad de la Planta 1	71
5.1.2	Análisis de mantenibilidad de los equipos	74
5.1.3	Análisis de número de fallas de los equipos	75
5.1.4	Análisis de modo y efecto de fallas (AMEF) del molino	76
5.2	IMPLEMENTACIÓN	82
5.3	EVALUACIÓN	91
CAPITULO VI ANÁLISIS Y DISCUSIONES DE RESULTADOS		95
6.1	Diagnóstico de la Disponibilidad antes de la Implementación del Sistema de Vibración y Sensado.....	95
6.2	Diagnóstico de la Disponibilidad después de la Implementación.....	102
6.3	Resultados Estadísticos	110
A.	Análisis descriptivo.....	110
B.	Análisis inferencial.....	113
C.	Prueba de hipótesis.....	116
6.4	Discusión de resultados	119
CONCLUSIONES		122
RECOMENDACIONES.....		123

Referencias	124
ANEXOS.....	1
Anexo 1	1
Anexo 2: Molino de bolas Kooper 16.5 x23.....	3
Anexo 3: Cartas ilustradas de diagnóstico de Vibración.....	5
Anexo 4: Tablas de severidad.....	11
Anexo 5: Hoja de Flujo de la Planta 1	12
Anexo 6: Evaluación de criticidad de activos de los Equipos rotatorios- Planta 1.....	13
Anexo 7: Configuración del Software MHM, en los puntos de sensado	14
Anexo 8: Espectros de los 4 puntos de acople del molino.	16
Anexo 9: Valores Globales de vibración del molino de bolas	22
Anexo 10: Cascadas de los puntos de sensado.....	24

Índice de Tablas

Tabla 1 Matriz de operacionalización de las variables	64
Tabla 2 Rango de criticidad	71
Tabla 3 Análisis de criticidad de los equipos – Planta 1.....	71
Tabla 4 AMEF del molino de bolas Kooper.....	76
Tabla 5 Disponibilidad del molino Kooper antes de la implementación.....	101
Tabla 6 Disponibilidad del molino Kooper después de la implementación	107
Tabla 7 Disponibilidad del molino Kooper pre y post test.....	110
Tabla 8 MTBF del molino Kooper del pre y post test	111
Tabla 9 MTTR del molino Kooper del pre y post test	112
Tabla 10 Cuadro de normalidad de la disponibilidad	114
Tabla 11 Cuadro de normalidad del MTBF	114
Tabla 12 Cuadro de normalidad del MTTR.....	115
Tabla 13 Contrastación de hipótesis, Disponibilidad.....	116
Tabla 14 Contrastación de hipótesis, MTBF	117
Tabla 15 Contrastación de hipótesis, MTTR.....	118

Índice de Figuras

Figura 1 Tipos de mantenimiento	16
Figura 2 Mantenimiento predictivo, monitoreo vibracional	18
Figura 3 Análisis vibracional de estado y campo	19
Figura 4 Registro de las vibraciones	20
Figura 5 Movimiento armónico simple	21
Figura 6 Análisis de tiempo y frecuencia	22
Figura 7 Sistema de registro de vibraciones	23
Figura 8 Control automático	23
Figura 9 Esquema del monitoreo local	24
Figura 10 Espectro convencionales	25
Figura 11 Series de Fourier.....	26
Figura 12 Aplicación de la Integral de Fourier	27
Figura 13 Unidades de Amplitud	29
Figura 14 Resonancia de Frecuencias críticas.....	30
Figura 15 Espectro Típico y relación de fase de desbalanceo.....	32
Figura 16 Espectro típico y relación de fase del balanceo de par de fuerzas	32
Figura 17 Espectro típico y relación del desbalanceo.....	33
Figura 18 Espectro típico y relación de fase del desbalanceo rotor en voladizo	33
Figura 19 Espectro típico y relación de fase del rotor excéntrico.....	34
Figura 20 Espectro típico y relación de fase del eje doblado.....	34
Figura 21 Espectro típico y relación de fase, desalineación angular.	35
Figura 22 Espectro típico y relación de fase de desalineación paralela.....	35
Figura 23 Espectro típico y relación de fase, rodamiento inclinado sobre el eje	36
Figura 24 Espectro típico y relación de fase de resonancia.....	36
Figura 25 Espectro típico y relación de fase en soldadura mecánica, Tipo A.....	37
Figura 26 Espectro típico y relación de fase en soldadura mecánica, Tipo B.....	37

Figura 27 Espectro típico y relación de fase en soldadura mecánica Tipo C.....	37
Figura 28 Soldaduras de elevación por desgaste o juego	38
Figura 29 Ruido por fricción del rotor, molino de aceite.	38
Figura 30 <i>Desgaste de dientes por fricción.</i>	39
Figura 31 Severidad de vibración.....	41
Figura 32 Molino de Bolas, Kooper	42
Figura 33 Amplitudes y pulsaciones.....	44
Figura 34 Molino de aceite	45
Figura 35 Holgura mecánica	46
Figura 36 Desalineamiento angular.....	46
Figura 37 Diagrama de funciones de vibraciones.....	48
Figura 38 Sensor de proximidad	48
Figura 39 Sensores de velocidad	49
Figura 40 Sensores de velocidad	49
Figura 41 Alineación de ejes de vibración	50
Figura 42 Analizador CSI 2140	53
Figura 43 Funcionamiento del analizador AMS 2140	55
Figura 44 Transmisión inalámbrica del Analizador AMS 2140.....	55
Figura 45 Motor síncrono de tipo rotor liso	56
Figura 46 Motor Trifásico jaula de ardilla.....	57
Figura 47 MTBF y MTTR, Disponibilidad.....	59
Figura 48 Tipos de mantenimiento en el tiempo.....	59
Figura 49 Ejemplo del RCM	60
Figura 50 Pilares del TPM.....	61
Figura 51 Diagrama de Pareto	62
Figura 52 Diagrama de Jack Knife	62
Figura 53 Diagrama de flujo – de la planta 1	70

Figura 54 Criticidad de equipos de la Planta 1	73
Figura 55 Diagrama de Pareto. Horas detenidas de los equipos Planta 1	74
Figura 56 Diagrama de Pareto de equipos por número de fallas – Planta 1	75
Figura 57 Diagrama de Jack Knife de equipos, Planta 1	75
Figura 58 Diagrama de Gantt, Actividades para la implementación	82
Figura 59 Analizador de Vibraciones.....	83
Figura 60 Ciclo de mejoramiento continuo	84
Figura 61 Molino Kooper 16.5x23 – puntos de medición.....	84
Figura 62 AMS 2600	85
Figura 63 CSI 2600 Machinery Health Expert (accessories)	86
Figura 64 Punto 1, lado libre del motor.....	87
Figura 65 Punto 2, Lado acople del motor.....	88
Figura 66 Punto 3, Lado acople del piñón	89
Figura 67 Punto 4, lado libre del piñón.....	90
Figura 68 Red de comunicación para el molino Kooper	91
Figura 69 Tendencia de los valores globales	92
Figura 70 Tendencia de los espectros de la Vibración	92
Figura 71 Producción de mineral tratado en unidad minera	93
Figura 72 Presupuesto para la planta 1.....	93
Figura 73 Propuesta Económica	94
Figura 74 Diagrama de Pareto, modos de fallas por Horas detenidas, Planta 1.....	95
Figura 75 Diagrama de Pareto, modos de falla por número de fallas, Planta 1	96
Figura 76 Diagrama de Jack Knife de los equipos de planta 1	97
Figura 77 Diagrama de Jack Knife de modos de falla en los equipos de la Planta 1	98
Figura 78 Disponibilidad de la planta de producción de Cu, agosto 2021.....	99
Figura 79 Disponibilidad mensual de los equipos.....	99
Figura 80 MTTR de Planta 1 antes de la implementación	100

Figura 81	Diagrama de Pareto de los equipos por Horas detenidas.....	102
Figura 82	Diagrama de Pareto de los equipos en el Planta 1	103
Figura 83	Diagrama de Pareto de modos de falla por horas detenidas	103
Figura 84	Diagrama de Pareto de modo de falla por número de fallas en la Planta 1 ..	104
Figura 85	Diagrama de Jack Knife - fallas , MTTR de equipos, planta 1	105
Figura 86	Diagrama de Jack Knife - fallas, MTTR de modos de falla, Planta 1	106
Figura 87	Comparación de la Disponibilidad del molino Kooper.....	108
Figura 88	Comparación del MTBF del molino Kooper	108
Figura 89	Comparación del MTTR del molino Kooper.....	109
Figura 90	Gráfico en el SPSS de la disponibilidad del pretest y postest.....	111
Figura 91	Gráfico en el SPSS de la Tiempo Medio entre Fallas del pretest y postest. .	112
Figura 92	Gráfico en el SPSS de la Tiempo Medio para reparar del pretest y postest .	113

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En el mundo los molinos de bolas generalmente se utilizan en las industrias de procesamiento de minerales para moler minerales al tamaño deseado (desde mm hasta micras). La trituración en el molino de bolas es un fenómeno complejo. La delimitación del comportamiento del proceso es un paso importante para comprender el proceso físico real que tiene lugar dentro del molino. El aprovechamiento de la energía para la molienda es generalmente entre el 1 y el 2 % de la energía suministrada, por lo que es necesario monitorear eficazmente el comportamiento del proceso para aumentar la eficiencia de la producción. El rendimiento se puede mejorar analizando y monitoreando el comportamiento del molino de bolas mediante un análisis vibracional (Mohanty et al., 2015).

Además, en la realidad industrial, un molino de bolas generalmente está formado por un tambor cilíndrico accionado por un motor eléctrico a través de un reductor de engranajes. Además del reductor, al molino está conectada directamente una corona dentada, cuya transmisión se realiza mediante un piñón exterior, lo que proporciona una etapa de reducción adicional. Durante su rotación, el tambor del molino eleva la carga por un lado hasta alcanzar la altura máxima de caída. A partir de esta posición, las partículas comienzan a caer independientemente del movimiento del tambor, descrito como un movimiento en cascada o en catarata dependiendo de la velocidad de rotación del molino. Al caer contra el tambor, las fuerzas de impacto de las partículas se crean y se transmiten a la caja de cambios a través del eje de transmisión. A pesar de la presencia de un revestimiento para absorber los impactos, las fuerzas de impacto producidas por el movimiento de la carga dentro del molino están presentes, y su amplitud puede aumentar con el desgaste del revestimiento. Por tanto, es necesario estudiar su influencia en el comportamiento dinámico mediante el monitoreo y análisis vibracional (Ngandu et al., 2022).

En Perú la industria minera es uno de los sectores más representativos del país. Dentro de su proceso productivo se encuentra la etapa de molienda. Esta etapa tiene como fin principal reducir el tamaño del mineral, requiriendo el uso de molinos dentro de los cuales se encuentran: los molinos de bolas, barras y semiautógenos (SAG). Uno de los principales problemas con el uso de los molinos es el desgaste de sus revestimientos debido a factores operacionales como las fuerzas de conminución y las características de los minerales. Este desgaste implica que se tenga que parar la operación del molino para su mantenimiento, conllevando pérdidas de tiempo y dinero que oscilan entre USD \$45,000 y USD \$ 60,000 por hora de parada, utilizando entre 4 a 8 horas por semana únicamente en revisar el desgaste de los revestimientos de forma manual. En este sentido, es importante encontrar formas de controlar y monitorear el desgaste de los revestimientos de los molinos que no implique paradas, consumo excesivo de energía ni cambios prematuros o tardíos de los mismos (Delgado P. J., 2019)

El caso más emblemático de una situación problemática en esta empresa minera es el referido al molino de bolas Koppers 16.5 x 23, encargado del procesamiento de metales pesados y que consta de una estructura de transmisión, eléctrica, de carga y descarga, sistema lubricante y unidad de avance lento como complemento. Los registros históricos de este molino en la empresa indican que en el último año presentó fallas relacionadas con abolladuras en las mangueras produciéndose escapes, averías en el sistema de lubricación, deterioro del revestimiento, grietas en los foros del muñón, entre otras que han ocasionado paradas afectando notablemente la productividad del área y en consecuencia de la empresa; todo ello porque no se realiza un adecuado proceso de mantenimiento preventivo y correctivo, por ende, dicha maquinaria tiende a bajar sus niveles de disponibilidad.

Ahora bien, en este contexto es preciso comentar que las TIC han representado un cambio para el sector productivo, se han potenciado el proceso de cambio y progreso constante en las empresas, generando significativamente la adopción de recientes

tecnologías y la propulsión hacia la tendencia a innovar en los ámbitos económico, social y productiva” (Cadena-Clavijo y otros, 2020).

Se trae a colación la anterior afirmación, ya que herramientas fundamentadas en tecnologías, tal como se presenta en el caso del sistema de censado y monitoreo online basado en análisis vibracional, cuya utilización ha tenido efectos positivos en la optimización de las condiciones de equipos industriales, generando un acercamiento pormenorizado a la realidad verificable de las maquinarias, de un modo preciso y ampliamente consistente (Maigua y otros, 2020).

Dadas las condiciones de la realidad expuesta y la importancia de las nuevas tecnologías hoy en día, se formula el siguiente problema de investigación.

1.2 Descripción del problema de investigación

1.2.1 Problema general

¿De qué manera se mejora la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16,5 x 23 en la compañía minera SMEB?

1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿De qué manera se determina la disponibilidad actual del molino de bolas Kooper 16,5x23 en la compañía minera SMEB?
- b) ¿De qué manera se identifica las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16,5x 23 en la compañía minera SMEB?
- c) ¿De qué manera se disminuye las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16,5 x23 en la compañía minera SMEB?
- d) ¿Cómo influye la propuesta en la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16,5 x 23 en la compañía minera SMEB?

1.3 Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo general

Proponer un sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional para mejorar la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16.5 x 23 en la compañía minera SMEB.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Analizar los indicadores (MTBF) y (MTTR) actual para determinar la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16.5x23 en la compañía minera SMEB.
- b) Analizar los modos y efectos de falla (AMEF) para determinar las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16.5x23 en la compañía minera SMEB.
- c) Proponer el sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional para disminuir las fallas funcionales del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en la compañía minera SMEB.
- d) Determinar los indicadores (MTBF) y (MTTR) después de la propuesta para comparar la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en la compañía minera SMEB.

1.4 Antecedentes Investigativos

Antecedentes Nacionales

Delgado Pomachagua (2019) desarrolló un estudio titulado: “Régimen de monitoreo en tiempo real del deterioro de los caparzones en los molinos tradicionales de la UM Uchucchacua”, cuya finalidad fue desarrollar un engranaje automatizado que garantice la obtención inmediata de información relativa al estado de deterioro de los revestimientos, basada en mecanismos de impacto generados en la superficie de estos, a través de la interacción operativa entre fuerza y desgaste. Metodológicamente, adopta un patrón cuantitativo con nivel experimental, empleando un ejercicio analítico de orden mecánico centrado en los revestimientos del tercer anillo, complementado por un 3 simulacro operativo del molino. En el proceso de implementación se formuló una estructura mecánica conformada mediante muelles de presión y cauchos en la absorción de las eminentes fuerzas de impacto, concretándose desde 0 y 90 N, y permitiendo una adecuada modulación de sensores de fuerza. Igualmente se formuló una estructura eléctrica conformada mediante sensores de fuerza de tipo FRS 402 con espectro medible desde 0 a 90 N, microprocesadores, redes inalámbricas, resistencia de alta exactitud, amplificadores operacionales, placa principal y fuentes de voltaje tanto positivas como negativas. Mediante estos mecanismos se obtuvieron el modelo preciso y efectivo para lograr el porcentaje de desgaste en tiempo real por medio de las denominadas fuerzas de impacto. Se concluyó que los datos obtenidos con la implementación del modelo constituyen lo esencial para tomar buenas decisiones y acciones por parte de los trabajadores supervisor y la dirección máxima de la compañía.

Guillen Montalvo (2019), efectuó un estudio titulado: “El diseño y la puesta en partida de un método de control, protección y supervisión del método de lubricación del Triturador de Bolas Hardinge 14'x24' en la planta concentradora de Cía. Minera Casapalca”, enfocado en la formulación y ejecución de un método de resguardo, control y supervisión del mecanismo lubricador del molino Hardinge 14'x24'. El patrón metodológico fue de tipo cuantitativo de orden preexperimental. Se tomó como grupo muestral a 3 molinos de la empresa en cuestión.

Por medio del análisis de los registros históricos y la observación en tiempo real del funcionamiento de las maquinarias, se logró precisar entre otras cosas, que la temperatura induce al recalentamiento y fricción en el interior del mecanismo de los molinos, por lo que es imperativa su regulación. Se diseñó y aplicó un método de resguardo, control y supervisión del sistema lubricador de los molinos, logrando valores aceptables en cuanto al flujo (6 gpm y 30 gpm), presión (400 psi y 700 psi) y temperatura del aceite del molino (35 °C y 45 °C). En particular, se alcanzó un mayor control de temperatura del aceite lubricador, empleando PLC Compact Logix L30ER, con el software RSLogix5000. Como conclusión fundamental se obtuvo que el monitoreo garantiza la obtención continua de datos donde se puede tomar de manera automática o manualmente.

Magnatte Zuñiga (2019) estableció en su investigación: “Ejecución del Sistema de Reducción de Sonido a través de la Sistematización Mecánica del Triturador Polveador en el Sector de Preparativa Mecánica de Muestras en la Planta Belén, ubicada en Chala, Arequipa. Año 2018”. Con el propósito de reducir los peligros laborales, se está trabajando en encontrar una solución alternativa que implica la mecanización de los molinos polveadores. El enfoque metodológico adoptado es correlacional y de diseño experimental. La población objeto comprende a los 24 empleados, mientras que la muestra se compone de 6 trabajadores, divididos en tres turnos laborales. Para la recopilación de datos, se emplean técnicas como la observación, entrevistas, fotografías capturadas con una cámara y un software de apoyo ocupacional. Estos elementos resultan esenciales para documentar eventos significativos en el transcurso de la investigación. Los resultados se tradujeron en la implementación del Creación de un sistema mecánico automatizado para los molinos pulverizadores., reemplazando el sistema previo de poleas, piñón y catalina con una configuración basada en moto reductor y variador de velocidad. Esta transformación tuvo lugar dentro del sector de Preparación de muestras de forma mecánica durante un periodo de 110 días naturales. Se realizó una evaluación del ruido en el entorno laboral y de la capacidad auditiva, mediante el Audiograma del Examen Médico Ocupacional (EMO), abarcando el período desde 2016

hasta 2018. En este lapso, se identificó un deterioro gradual del 6,69% en relación con el año inicial (2016) en un conjunto de 6 operadores. Se concluye que el nivel de sonido al que el personal expuesto se encuentra en el sector de preparativo de Mecánica de Muestras, de acuerdo con la supervisión final, es de 70.4 dB, y se sitúa en los límites aceptables, lo que representa una disminución del 24.14% respecto al monitoreo inicial.

Leyva Alcazaba (2020) desarrolló una investigación denominada “Propuesta de mejora del mantenimiento predictivo por análisis vibracional para aumentar la disponibilidad de los equipos críticos en la Empresa Azucarera”, La necesidad de eliminar problemas latentes, fallas mecánicas y operativas que causan tiempos de parada no planificados llevó a la realización de un estudio. Este estudio se basó en métodos deductivos y se llevó a cabo como una investigación de tipo pre experimental en un conjunto de 20 equipos ubicados en el área de lavaderos de una empresa azucarera. Los resultados principales revelaron que la disponibilidad promedio actual de los equipos críticos era del 75.02%. Como solución, se propuso mejorar el mantenimiento predictivo mediante el análisis vibracional, lo que aumentó la disponibilidad de los equipos críticos al 97.26%. Se realizó una prueba de hipótesis estadística utilizando la prueba T de Student, que arrojó un valor menor a 0.05, respaldando la afirmación de que la propuesta de mejora del mantenimiento predictivo mediante el análisis vibracional aumentará la disponibilidad de los equipos de la empresa azucarera. En conclusión, se determinó que la implementación del proyecto es factible y que se logrará un aumento del 20.43% en la disponibilidad.

Gavidia Morales y Rodríguez Lavado (2020) ejecutaron un estudio designado: “La ejecución de ACR, empleando estudio de vibraciones, con la finalidad de avalar el trabajo conveniente de los trituradores demoduladores de cáscara de caña de azúcar en una compañía de producción de papel” centrado en analizar los molinos desmeduladores para garantizar el funcionamiento de las máquinas y optimizar los puntos referentes como producto de la ejecución de un plan de sostenimiento. En lo metodológico, se estableció un esquema cuantitativo de orden pre experimental. Para el proceso se seleccionaron

cuatro molinos de empresas papeleras. La evaluación y análisis de registros históricos determinó que en tres de los molinos existen fallas que sintetizan la disponibilidad en 89.65%, 88.941% y 90.37% y confiabilidad en 90.19%, 89.89% y 91.20%. El análisis 4 de criticidad indicó 4 fallas considerables y 3 regulares. Se elaboró y aplicó en simulacro el plan de mantenimiento basado en **análisis causa raíz** (ACR), logrando que los molinos alcanzaran un nivel mínimo de disponibilidad de 95.8%, 95.5% y 96.4% y confiabilidad de 90.2%, 90% y 91%. Se concluyó que el plan de mantenimiento adoptado tuvo resultados altamente favorable en la confiabilidad y disponibilidad de los molinos seleccionados en el procedimiento.

Inga Juniors (2021), con el nombre de su tesis: "Optimización de la confiabilidad mecánica del triturador de bolas de 9x13 pies con el objetivo de aumentar la producción diaria en la mina Sierra Antapite ". El fin de la investigación es enfocar la problemática de la escasa elaboración en la mina, centrando el análisis en el molino de bolas. Dado que este molino desempeña un papel fundamental al determinar la cantidad diaria de tonelaje, se considera como un equipo primordial. Esta sección específica se ha convertido en el punto crítico debido a la insuficiente producción de tonelaje. Por esta razón, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva para asegurar que estuviera funcionando de manera óptima. La disponibilidad de un aparato redime un papel esencial en la gestión del mantenimiento, y al analizar sus indicadores clave de rendimiento (KPIs) pudimos calcular el porcentaje de disponibilidad mecánica y capacidad de sostenimiento que estaba siendo gestionado por la mina. El enfoque de investigación adoptada es rigurosamente sistemático, y pertenece al ámbito técnico en un nivel aplicado con un esbozo ex post facto. En este estudio se enfoca en una población y muestra específicas, concretamente en un único caso de estudio: el molino de bolas 9x13 ft de la unidad minera Sierra Antapite. Para la recopilación de datos, se emplea una combinación de fuentes documentales y observaciones empíricas. Esta última técnica incluye la observación directa, los medios empleados para recabar información incluyen fichas de observación, formularios, guías de seguimiento, registros en papel y cámaras fotográficas. El triturador de bolas Allis Chalmers 9x13 ft experimentó mejoras

notables en su disponibilidad mecánica. Inicialmente, esta se situaba en un intervalo entre el 87% y el 89%, lo que afectaba la producción diaria estimada en alrededor de 27 toneladas por hora (t/h). Sin embargo, al elevar la disponibilidad al 93% mediante la implementación de un mantenimiento corrector dirigido a los equipos prioritarios del molino, se logró un aumento en la elaboración diaria a un promedio de 30 t/h. En consecuencia, se puede concluir que la eficiencia mecánica del molino de bolas experimentó un aumento significativo, elevándose del 87% al 93% en un promedio a lo largo de los meses siguientes. a la evaluación y la ejecución de los mantenimientos correctivos planificados en el triturador de bolas Allis Chalmers 9x13 ft.

Rosado Alvarado (2022), con el título de tesis “Mantenimiento predictivo por método Shock pulse para aumentar la disponibilidad de equipos rotativos en una planta de harina de pescado”, CFG Investment SAC, una compañía dedicada a la producción de harina y aceite de pescado, con una instalación en Chicama Norte, está en busca de elevar su tasa de disponibilidad de planta actual del 86.4%. Para lograr este objetivo, están explorando la posibilidad de implementar un enfoque de mantenimiento predictivo utilizando el método de shock pulse. Para identificar las áreas críticas que requieren atención, se han seleccionado 14 equipos rotativos, utilizando una metodología basada en el riesgo que categoriza estos equipos como no críticos, semi críticos o críticos en función de una evaluación semi cualitativa de su importancia. Para los 14 equipos rotativos identificados como críticos, se ha desarrollado un programa de mantenimiento que detalla el alcance, el método y los instrumentos a utilizar, así como las frecuencias de ejecución, tanto por personal interno como por terceros. Los formatos establecen el plan de medición y los datos que deben recopilarse por parte del operador y el técnico de mantenimiento, incluyendo inspecciones visuales y el uso del instrumento Bearing Checker. Los resultados de estas mediciones se registrarán en una hoja de cálculo de Excel y se analizarán para predecir posibles fallos en los elementos rodantes de los equipos rotativos. La implementación de este enfoque de mantenimiento predictivo tiene un impacto positivo en el flujo de efectivo, con indicadores financieros que

incluyen un Valor Actual Neto (VAN) de \$25,658 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 23%, asumiendo una tasa de interés del 2% mensual. Estos resultados respaldan la viabilidad de la investigación y la implementación propuesta.

Hernández Cotrina y Serrano Bringas (2022), en la tesis llamada “Plan de sostenimiento anticipado destinado a mejorar la disponibilidad de la máquina en Molino Galán EIRL, ubicado en Guadalupe, durante el año 2021” sostiene como objetivo esencial llevar a cabo el sostenimiento anticipado para aumentar la disponibilidad de las maquinas en el Molino Galán. EIRL. La orientación es de tipo tecnológica, aplicada, con esbozo pre experimental. El estudio abarcó en el registro de la eficiencia mecánica del equipo en el periodo de enero a abril del 2022. La técnica e instrumentos para el propósito de recopilar información se utilizaron guías de entrevista y observación, donde se obtuvo como resultado principal el incremento de disponibilidad de la maquinaria de 87.7% a 96.59%. Asimismo, los indicadores de MTBF se mejoró de 20.42 a 52 Hrs, y el MTTR se mejoró de 2.88 a 1.8. Se concluyó que el mantenimiento provisorio desarrollado mejoró la disponibilidad del equipo en el Molino Galán E.I.R.L. en un 10.1%.

Luque Sevincha (2023), con el nombre de trabajo de investigación “Monitoreo de condición y análisis de fallas, mediante técnicas predictivas análisis vibracional, termografía y ultrasonido acústico al molino vertical vertimill”, Se tiene la intención de llevar a cabo una serie de mediciones no destructivas con el propósito de prever posibles fallos. Esto se debe a que el proceso de producción demanda cada vez más a diario. Este enfoque de mantenimiento aporta un valor adicional, ya que se implementa mientras la maquinaria está en funcionamiento, sin detener el proceso productivo. Su objetivo es anticipar fallos mediante la monitorización continua del rendimiento de la máquina. Se concluye que los diagnósticos del análisis del monitoreo dan resultados positivos para el estudio, los niveles de vibración en el motor están dentro de los límites permitidos, y no se detecta ningún problema en los elementos rotativos. La situación es típica o estándar. Se procede a identificar las principales técnicas de mantenimiento predictivo y destacar sus características clave. Además, se

resalta la importancia de la ejecución de estas técnicas en la organización. Ademinsac ha integrado equipos especializados en su estructura para brindar comodidad y calidad a sus clientes más destacados. La empresa cuenta con experiencia en la aplicación de estos análisis dentro del contexto del mantenimiento predictivo y la confiabilidad, siempre enfocándose en la excelencia y proporcionando asesoramiento, inspección y formación.

Antecedentes Internacionales

Canto Solís (2018), en su tesis “Examinar la velocidad angular instantánea en maquinaria rotativa como una técnica para supervisar su estado. Aplicación específica en sistemas de transmisión planetaria y en molinos de bolas”, tiene como propósito central examinar el uso de la Velocidad Angular Instantánea (IAS) como una técnica para supervisar las condiciones en diversas situaciones operativas, con el objetivo de reducir las imprecisiones en las mediciones. La metodología empleada abarca dos áreas: en el caso de la transmisión planetaria, implica la realización de pruebas bajo distintas condiciones operativas y variación en daños de la transmisión. Utilizando la IAS, se lleva a cabo un análisis de los daños infligidos al sistema. En cuanto al molino de bolas, se efectúan pruebas bajo variadas cargas y cambios en la velocidad. Posteriormente, basado en la evaluación de las mediciones obtenidas, se requiere detectar discrepancias en los patrones de la tendencia del molino. El propósito subyacente consiste en identificar parámetros potenciales para su caracterización. Los resultados obtenidos revelan las fallas localizadas a través de un análisis espectral de la IAS. El cálculo de la amplitud máxima de la señal promediada demuestra ser eficaz al arrojar resultados positivos, lo que simplifica la correcta identificación de daños en todas las condiciones. Se llegó a la conclusión de que la implementación de la comprobación IAS como instrumento para el diagnóstico resulta sumamente beneficiosa para la supervisión de máquinas rotativas. Esto permite detectar fallas localizadas tanto en transmisiones planetarias como en molinos de bolas. Además, posibilita la evaluación de medidas de la carga dentro del molino y la cabida de transporte de las cargas.

Zamora Rodríguez (2018), con su tesis “Creación de un plan de sostenimiento para un triturador de bolas en la organización Compañía Minera Cerro Negro S.A.” El propósito central de este estudio se enfoca en desarrollar un plan de sostenimiento para el triturador de bolas G de la Compañía Minera Cerro Negro S.A. En la actualidad, este molino ha estado operativo durante 6 meses y se ha consolidado la máquina fundamental en el área de molienda, siendo responsable de procesar alrededor del 75% del mineral de sulfuro. No obstante, este equipo presenta una frecuencia significativamente alta de fallos y carece de un plan establecido tanto para su mantenimiento como para la adquisición de repuestos necesarios. Esta problemática resulta crítica tanto en términos operativos como económicos, añadiendo a esta situación, se destaca la falta total de registros, manuales y directrices proporcionadas por el fabricante respecto al funcionamiento y mantenimiento de este equipo dentro de la empresa. Se empleó una compilación de registros de fallas de un molino similar con el propósito de averiguar esta información al molino perteneciente a la empresa. A partir de esto, se realizó un análisis de fallas y de su nivel de criticidad con el objetivo de identificar los componentes críticos del equipo. Además, se aplicó el modelo Weibull para diseñar la estrategia de mantenimiento, asegurando que se cumplan los requerimientos según las condiciones particulares y procurando reducir el costo derivado de las fallas. Debemos tener en cuenta la sugerencia del procedimiento de mantenimiento y el plan de suministros como un piloto inicial en la Compañía Minera Cerro Negro S.A. Con el tiempo, estos planes se irán perfeccionando en función del adelanto en la calidad de las exploraciones y los resultados obtenidos, con el objetivo de adaptarse y evolucionar conforme se avanza.

Calle Lazo (2020), con el trabajo “Propuesta de integración del análisis de vibraciones al plan de mantenimiento, predictivo de los rodillos de las prensas 1 y 2 en el molino de Cartopel S.A.I.”, En este informe se presenta una propuesta detallada para incorporar el análisis de vibraciones como parte integral del plan de mantenimiento predictivo destinado a los rodillos de las prensas 1 y 2, ubicadas en el molino de la empresa Cartopel S.A.I. El propósito principal de esta iniciativa es monitorear de forma continua la vibración de estos

componentes, con el fin de establecer umbrales de alarma que actúen como señales tempranas en caso de detectar niveles elevados de vibración que pudieran amenazar gravemente la integridad de las prensas. Este enfoque se basa en las directrices y criterios establecidos en la norma ISO 10816 donde se proporciona pautas específicas para la evaluación de vibraciones en maquinaria industrial. La implementación de esta propuesta permitirá un seguimiento constante de la tendencia de vibración en los rodillos, lo que, a su vez, ayudará a anticipar posibles problemas y a tomar medidas preventivas antes de que se produzcan daños significativos en las prensas.

Castro Acevedo (2022), con el proyecto titulado “Mantenimiento predictivo” A través del análisis de diversas gráficas y tendencias de variables como las vibraciones mecánicas, temperaturas, desgaste y datos operativos en sistemas de control, se puede obtener información sobre el rendimiento de los equipos en diferentes períodos. Este enfoque se conoce como mantenimiento predictivo o basado en la condición, y su objetivo principal es permitir la priorización y optimización del mantenimiento preventivo. Como resultado, se pueden reducir las interrupciones no planificadas y tomar decisiones más informadas en relación con los planes de producción y mantenimiento. Es esencial destacar que uno de los aspectos críticos es la gestión de repuestos, ya que la clave de esta estrategia de mantenimiento radica en la detección temprana de fallos, lo que brinda un período considerable para planificar futuros reemplazos. Algunas piezas, debido a su complejidad de fabricación, origen o costo elevado, como los conjuntos de engranajes y rodamientos de gran tamaño, pueden ser difíciles de adquirir en un corto plazo. Por lo tanto, el monitoreo de condiciones desempeña un papel fundamental, especialmente en equipos considerados críticos.

Páucar Moya (2022), En la tesis titulada “Estudio de ruido laboral y vibraciones en el área de molinos y pastificio de la empresa Industrias Catedral S.A.”. Los procesos de producción asociados con la molienda de granos y la fabricación de pastas están estrechamente vinculados al uso de maquinaria, lo cual ha simplificado las labores, pero

también constituye una fuente de ruido y vibración. Estos dos factores representan riesgos que pueden causar diversos problemas de salud en los trabajadores. El propósito de este estudio es evaluar los niveles de ruido y vibración a los que están expuestos los empleados. La investigación abarca el análisis de los puestos de trabajo, que incluye la descripción de las tareas, la identificación de las fuentes de generación de ruido y vibración, la definición de pautas de trabajo y grupos de exposición similares, la medición de los niveles de ruido y vibración, así como la comparación de estos valores con los límites permitidos. Los resultados indican que el 100% de los trabajadores en las áreas evaluadas están expuestos a niveles de ruido que superan los 85 dB(A), mientras que la exposición a vibraciones es mínima y se encuentra significativamente por debajo del límite permitido ($1,15 \text{ m/s}^2$). Como conclusión, se establece que las condiciones actuales de exposición al ruido en la empresa pueden dar lugar a trastornos de salud inaceptables para los trabajadores, mientras que, aunque la exposición a las vibraciones es muy baja, podría generar problemas relacionados con el mareo y el malestar, además de generar incomodidad durante la realización de sus tareas.

Salazar Castro (2023), desarrolló la tesis titulada "Creación de un piloto de sostenimiento previsorio en una instalación de molienda SAG mediante el uso de redes Bayesianas y técnicas de Deep Learning". Este trabajo de investigación tiene como propósito central crear un enfoque de mantenimiento predictivo que se fundamenta en Deep Learning y Redes Bayesianas aplicado en la planta de molienda SAG. La metodología empleada gira en torno a la cogida de datos, el preprocesamiento de dichos datos y la formación de modelos de aprendizaje automático. Esto se lleva a cabo a través del uso de redes neuronales que adquieren incertidumbre desde una data base creada por sensores, los cuales registran información con el propósito de realizar proyecciones. Los resultados se presentan a través del refinamiento de los datos concernientes a variables críticas del sistema. Se emplearon 11 redes neuronales bayesianas para la fase de molienda, que posteriormente se integran en dos diseños de arquitecturas de red bayesiana. Estos pasos culminan en la generación

de predicciones a nivel sistémico, registradas en el sistema de mantenimiento existente. La conclusión principal es que se logró implementar con éxito la capacidad de generar predicciones a través de una combinación de Red Neuronal y Red Bayesiana. Esto no solo se alinea con una perspectiva tecnológica avanzada, sino que también proporciona una herramienta para los operadores, permitiéndoles tomar decisiones informadas en el ámbito del mantenimiento.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Marco Teórico

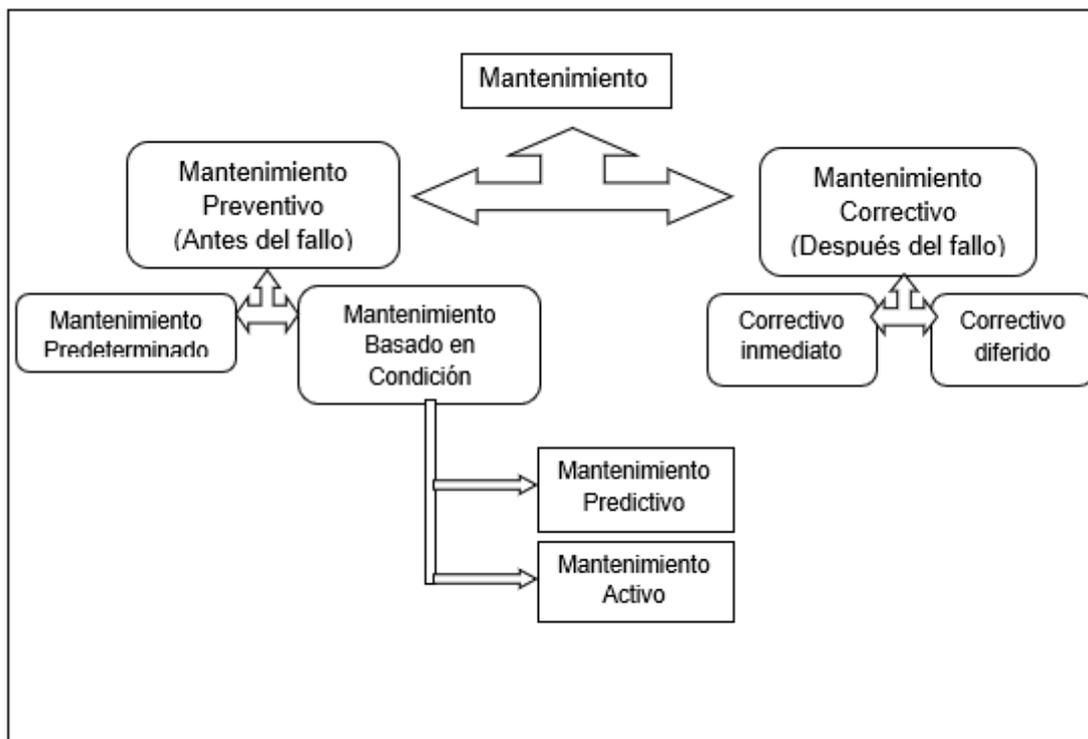
2.1.1 Mantenimiento

El mantenimiento es conceptualizado al cúmulo de actividades orientadas al sostén o reacondicionamiento de una pieza, máquina o sistema de una fase por lo que pueda cumplir las actividades que le competen. Asumiendo que la función viene a ser cualquier actividad de naturaleza operativa y ejecutada por un mecanismo determinado (Sexto, 2017).

La figura 1 nos proporciona una representación textual de los diferentes tipos de mantenimiento. Esta representación ayuda a visualizar y comprender mejor los conceptos detrás de cada tipo de mantenimiento.

Figura 1

Tipos de mantenimiento



Nota. Fuente: Sexto (2017)

2.1.2 Tipos de mantenimiento

a) El mantenimiento correctivo

Trata vínculos de funciones de carácter técnico, encaminadas a la corrección de averías de la maquinaria que ameriten respectivamente reparación o sustitución. Este mantenimiento corrige errores dependientes de la intervención para regresar a la función inicial. Estas acciones no son dependientes de alguna planificación (Sexto, 2017).

b) El mantenimiento preventivo

Corresponde al abordaje de la máquina para la manutención de esta por medio de la ejecución de acciones de reparación, garantizando su funcionamiento óptimo antes de cualquier falla. Las estadísticas, el listado de fallas proveniente del fabricante y la comunicación abierta con el o los operarios encargados son garantías de un mantenimiento preventivo con cierto grado de eficacia (Sexto, 2017).

c) El mantenimiento predictivo

Es una metodología basada en herramientas y técnicas analíticas de información para la detección de fallas en el funcionamiento y posibles defectos en las máquinas y procesos, de forma tal, que sean solucionadas previa ocurrencia de una falla. El mantenimiento predictivo posee tres componentes básicos: Los sensores y mecanismos conectados en las máquinas para el envío en tiempo real de información relativa a cada punto de la maquinaria, las soluciones de software y el almacenamiento en la nube que facilitan la colección y evaluación del gran volumen de fichas y los modelos predictivos alimentados con información procesada (Sexto, 2017).

En la figura 2 se presenta un sistema integral que utiliza sensores incorporados en una máquina industrial para recopilar datos en tiempo real, que luego son transmitidos a un nodo central de datos y analizados por un sistema de análisis de datos. Los resultados se presentan en una pantalla donde se muestran gráficos de tendencia, umbrales de alarma y notificaciones visuales de problemas

detectados. Este enfoque permite una toma de decisiones proactiva, identificando y abordando problemas potenciales antes de que ocurran fallas, lo que reduce el tiempo de inactividad, los costos de mantenimiento y mejora la eficiencia operativa.

Figura 2

Mantenimiento predictivo, monitoreo vibracional



Nota. Fuente: (PTSAC, 2023).

2.1.3 Mantenimiento Predictivo apoyado en el Análisis Vibracional

Emplea diversas áreas de conocimiento, siendo el análisis periódico de vibraciones una de las más fundamentales. En numerosas ocasiones se justificó que, entre aquellas evaluaciones no invasivas realizables al equipo, el análisis de las vibraciones ofrece los datos más a detalle sobre una operación interna. Ciertos equipos tienen el potencial de afectar negativamente las actividades en la instalación en caso de una falla, donde se puede ejecutar el régimen de monitoreo continuo de agitaciones. En dicho sistema se activará una alarma si el nivel de vibraciones supera un umbral predefinido. Esto permite prevenir fallas que podrían propagarse rápidamente y ocasionar una interrupción catastrófica. Este enfoque de monitoreo se utiliza mayoritariamente en equipos modernos impulsados por turbinas (White, 2010).

Existen análisis que permiten monitorear el estado de una máquina e identificar anomalías en su funcionamiento. En la figura 3 se muestra un gráfico que representa las vibraciones de una máquina industrial donde se presenta patrones de oscilación periódica de la máquina.

Figura 3

Análisis vibracional de estado y campo



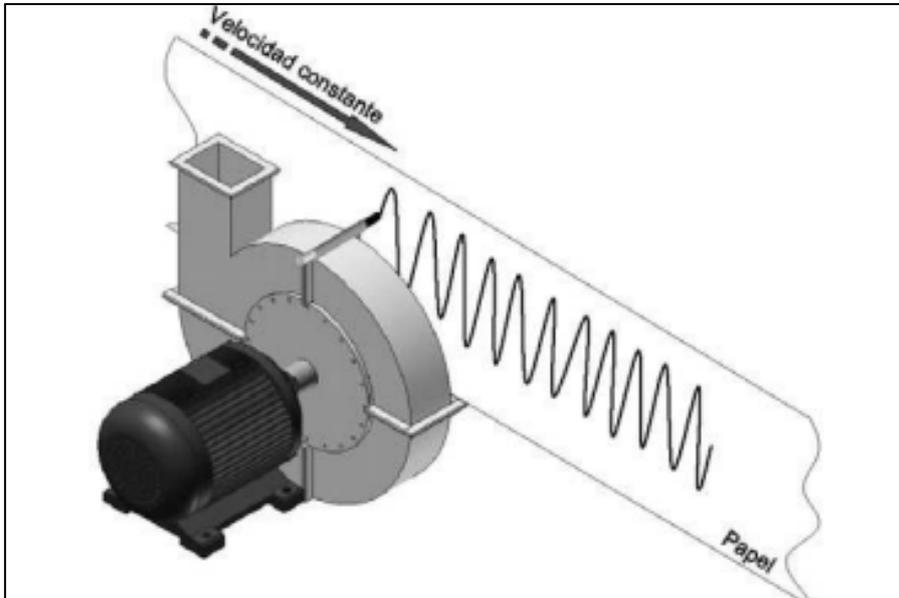
Nota. Fuente: Tomado de (PTSAC, 2023)

2.1.4 Concepto de vibración

En su representación más elemental, una oscilación o la tendencia repetitiva de un objeto cerca de un enfoque se le conoce como vibración bajo una posición de balance. Es aquella a la que el objeto regresará cuando la fuerza que ejerce al mismo desaparece por completo. A esta categoría de oscilación se le llama "oscilación de cuerpo íntegro", lo que implica que los componentes del objeto se desplazan en conjunto en orientación idéntica en todos los casos como se muestra en la figura 4 (White, 2010, pág. 16)

Figura 4

Registro de las vibraciones



Nota. Fuente: Tomado de Palomino (2007, pág. 33)

2.1.5 Historia del análisis de vibración en la maquinaria

El primer mecanismo de análisis vibratorio es el propio cerebro humano en combinación con los sentidos y con un proceso de adiestramiento. Sin embargo, este mecanismo falla cuando se trata de colocar cifras a las mediciones de vibraciones y archivar registros; por ello se desarrollaron metodologías mecánicas y electrónicas, reflejadas en medidores de vibración introducidos en el mercado durante la década de los 50's , y con el propósito de medir "el nivel generalizado o mediciones de vibración en equipos se pueden expresar en términos de amplitud de banda ancha, ya sea en mils (milésimas de pulgada) de desplazamiento pico a pico o en pulgadas por segundo (IPS) de velocidad vibratoria." (White, 2010, p. 71).

2.1.6 Movimiento armónico simple

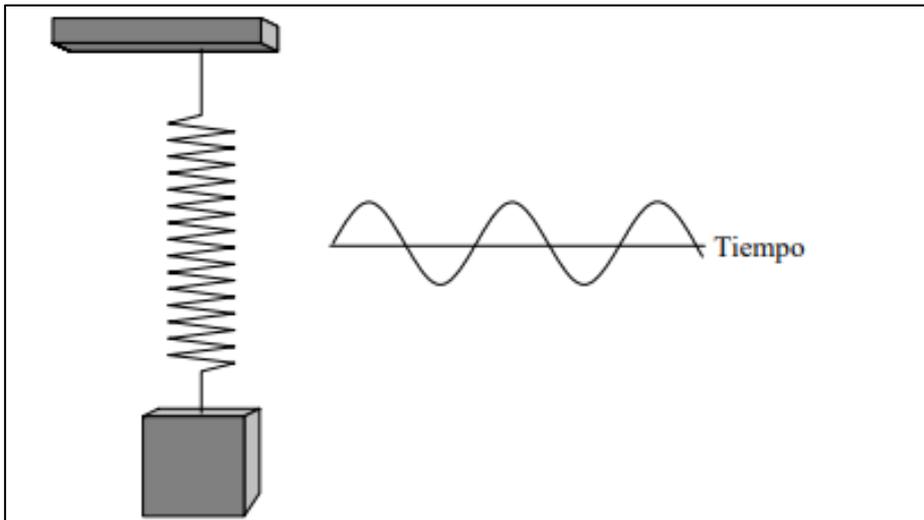
La forma más fundamental de movimiento que se presenta en el desplazamiento en una única orientación de masa que está evaluada en el resorte individual se le denomina "sistema masa-resorte", tal como se muestra en la Figura 5

El movimiento armónico simple (MAS), se desarrolla al desplazar una cierta distancia la masa del punto de equilibrio y soltarla, el resorte hace que la masa regrese al

punto de equilibrio y volver con una fuerza hasta el punto donde se soltó, este proceso se repite convirtiendo una energía cinética de la masa a potencial del resorte. (White, 2010, pág. 17).

Figura 5

Movimiento armónico simple



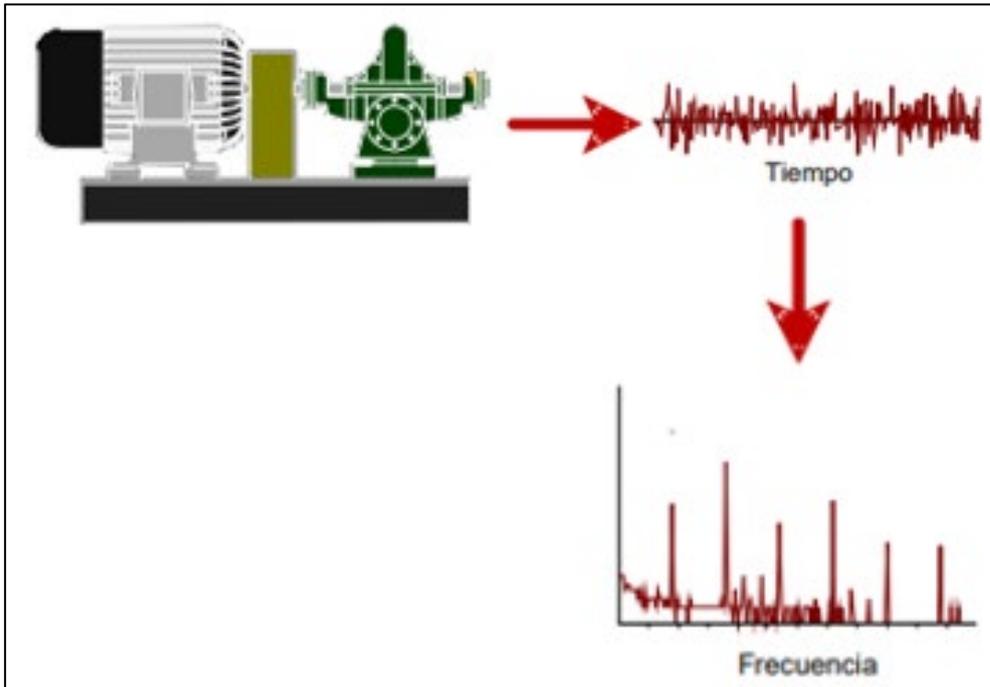
Nota. Fuente: White (2010) p. 17

2.1.7 Análisis de frecuencia

Para rodear las restricciones de la evaluación de la forma de onda, la acción más habitual consiste en realizar un análisis de frecuencias, también conocido como análisis espectral del signo de oscilación. La representación en el dominio temporal se denomina representación de onda, mientras que la representación del mando de las frecuencias se conoce como espectro la evaluación del espectro, que equivale a convertir los datos de la señal desde el dominio temporal de tiempo al dominio de las frecuencias, como se evidencia en la figura 6. (White, 2010)

Figura 6

Análisis de tiempo y frecuencia



Nota. Fuente: Tomado de White, (2010).

Asimismo, en los años setenta llegaron el computador y la unidad de procesamiento de señales digitales en analizadores, posibilitando la medición de rango de frecuencias más veloz desde una grabación. En los ochenta aparecen los microprocesadores de un solo chip de silicón, seguido mediante la utilización de un dispositivo portátil de análisis de señales digitales, que se define como "un instrumento que, junto con un software informático, almacena información y controla las facetas racionales de la adquisición de información.". Se logró una transformación radical en cuanto a cómo se utiliza el proceso de análisis de vibración para el diagnóstico de maquinaria (White, 2010, p. 71).

2.1.8 Sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional

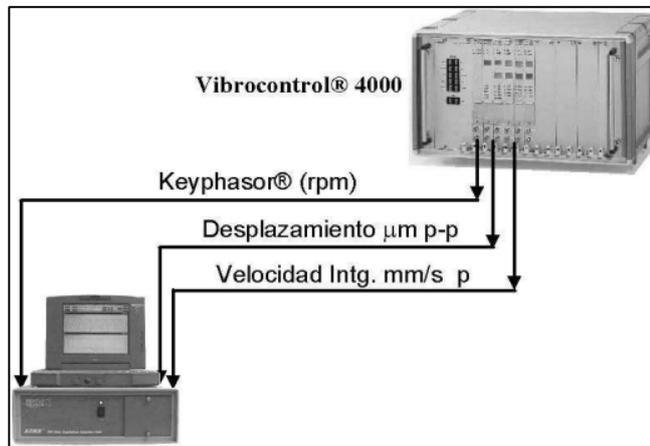
a) Sistemas de control y monitoreo

Estos mecanismos transforman las fluctuaciones del fenómeno físico en cambios proporcionales en una variable eléctrica, capturando así datos de los parámetros de interés. En términos de energía, son responsables de dirigir el desempeño de los indicadores de eficiencia. Involucran múltiples dispositivos que ajustan el grado de complicación de la red comunicativa, dependiendo de la amplitud

y diversidad de los subsistemas bajo supervisión, así como se evidencia en la figura 7 (Peña y otros, 2018).

Figura 7

Sistema de registro de vibraciones



Nota. Fuente: Palomino (2007), p 186.

- **Control automático**

Se refiere a un elemento esencial para optimar el desempeño y la virtud en los distintos métodos industriales. Específicamente se trata de incrementar la eficiencia de los recursos en tareas manuales, lograr información precisa de los procesos, enviar información en tiempo existente y someter al mínimo los gastos de instalación y hardware, tal como se muestra en la Figura 8 (Defas & Guzmán, 2017).

Figura 8

Control automático



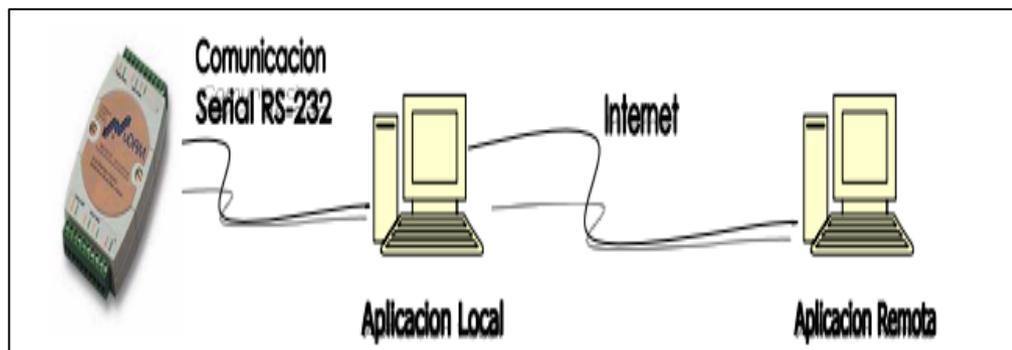
Nota. Fuente: Tomado de Defas y Guzmán (2017).

c) Monitoreo local y remoto

El monitoreo local radica en una maquinaria que funge como servidor de datos y servidor web, la cual se encuentra conectada al equipo de recojo de datos y está encargada de elementos como el comienzo operativo del sistema, elección de frecuencias de cálculo, estructuración de los espectros de medición y la factibilidad para la habilitación o no de los canales correspondientes. Además, envía datos en tiempo real al mecanismo remoto. El monitoreo remoto opera por medio de la web en el equipo de cada usuario, y está encargado del control y monitoreo del dispositivo, evidenciando cada modificación realizada en el punto residencial del módulo, como se muestra en la figura 9. (Carrazana y otros, 2007).

Figura 9

Esquema del monitoreo local



Nota. Fuente: Carrazana (2007).

d) Supervisión de oscilaciones en equipos

Científicamente se comprobó que la característica de oscilación de un equipo en funcionamiento proporciona datos certeros de su funcionamiento interno. Por ejemplo, cuando un rodamiento presenta una avería pequeña, genera variaciones representado a la oscilación del equipo. El análisis de oscilaciones eficazmente realizado posibilita el descubrimiento de pequeñas fallas mecánicas de manera previa a su conversión en una amenaza grave para la máquina, lo cual permite la programación del mantenimiento respectivo (White, 2010).

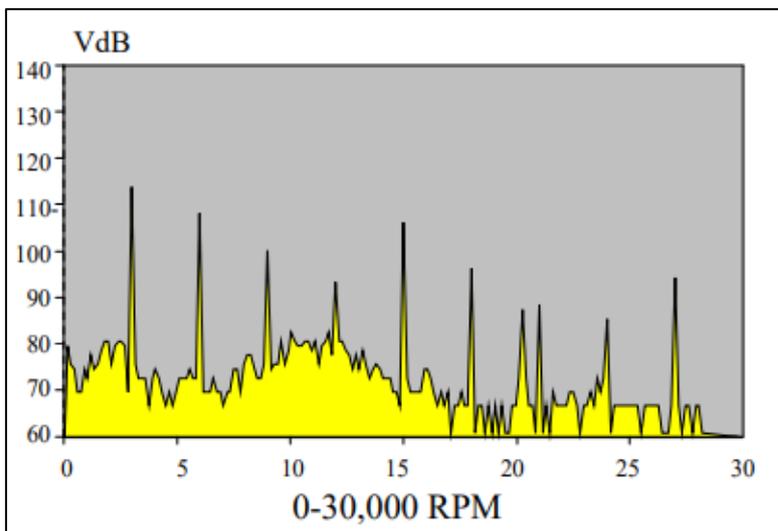
2.1.9 Espectros de vibración de maquinaria

Generalmente las máquinas poseen un cúmulo de frecuencias forzadas con un relativo grado de sencillez, determinados por el aspecto del equipo y la rapidez correspondiente. La presencia de frecuencias adicionales, como los múltiplos de 1x en la señal de oscilación, indican una relación lineal, y la suma de estas nuevas frecuencias es un indicador positivo del estado general del equipo. (White, 2010)

Cuando la maquinaria experimenta desgaste, la característica de vibración se vuelve más intrincada a causa de la producción de armónicos y frecuencias secundarias. Esto corrobora lo planteado por el autor: "Cuando se registra una evolución en el nivel de oscilación del dispositivo a lo largo del tiempo, un aumento en las frecuencias impuestas señala una modificación al funcionamiento del equipo". Esto se evidencia en la figura 10 (White, 2010, pág. 83).

Figura 10

Espectro convencionales



Nota. Fuente: White (2010, pág. 82)

2.1.10 Serie de Fourier

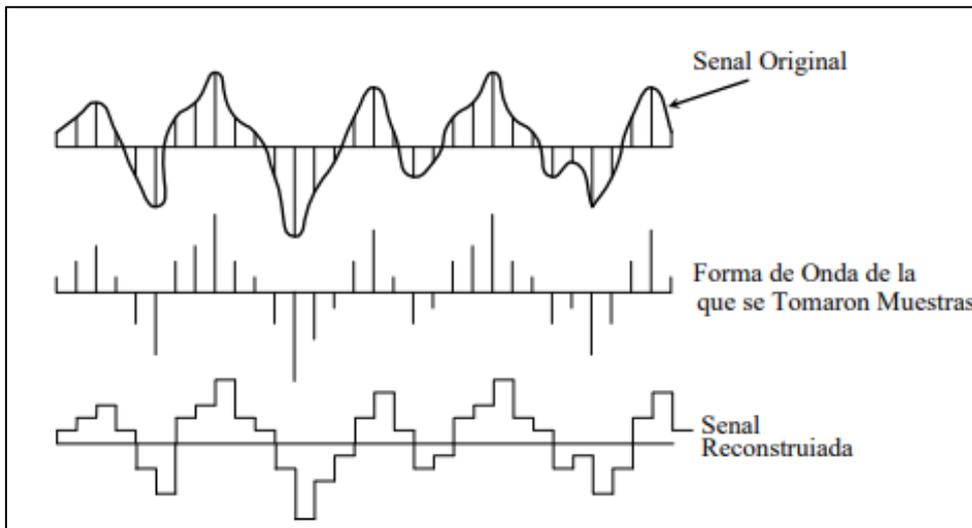
El funcionamiento del algoritmo de Fourier se basa en una señal temporal que exhibe periodicidad. Esto significa que la forma de la señal se repite infinitamente a lo largo del tiempo. Fourier estableció que una señal de esa naturaleza tiene la capacidad de

representarse como una mezcla de funciones seno y coseno, cada una con frecuencias que son múltiplos de la inversa del período de la señal original. Lo notable prácticamente es cualquier representación de onda que no sea de duración imperecedera. Puede ser descompuesta en una serie de dispositivos armónicos. (White, 2010).

En resumen, Fourier, como se muestra la figura 11, admite descomponer una señal habitual en una serie de componentes armónicos, lo que revela cómo la señal está compuesta a nivel de frecuencias y amplitudes.

Figura 11

Series de Fourier



Nota. Fuente: White (2010).

2.1.11 Transformada de Fourier

Opera utilizando funciones matemáticas y señales donde se crea un conjunto de modelos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. El conjunto resultante es un acercamiento de la Serie de Fourier. Un acercamiento en la indagación entre los modelos de la forma de onda original se ha perdido. La clave para la Transformada Discreta de Fourier (TDF) radica en la presencia de una representación de onda de la cual se han tomado estos modelos, lo que implica la posibilidad de simbolizar la representación de onda como una secuencia numérica. Para crear esta secuencia a partir de una señal analógica es preciso realizar un proceso de muestreo y una transformación de analógico a la digital. Este proceso

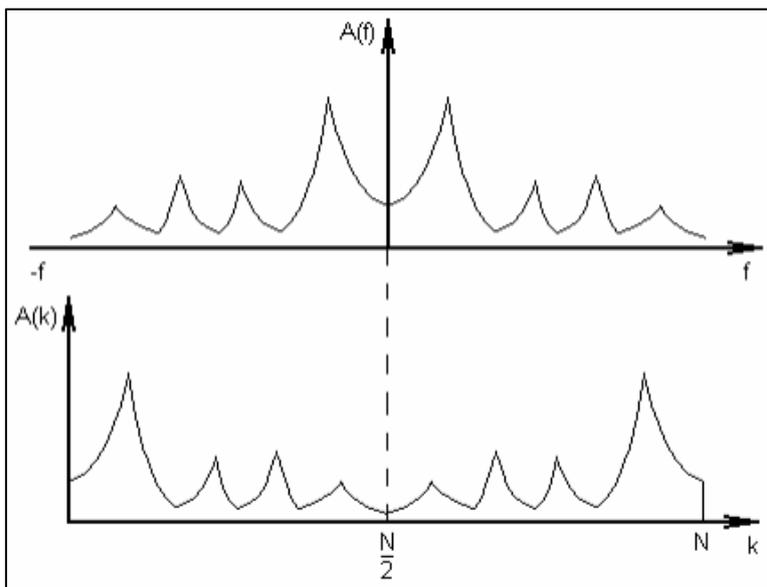
de muestreo implica la toma periódica de muestras de la señal analógica, y la conversión de analógico a la digital implica traducir los valores de la señal analógica en valores numéricos discretos (White, 2010 p.60).

2.1.12 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

En la actualidad, los adelantos en la electrónica digital han posibilitado la integración de la FFT, ampliamente reconocida en dispositivos de medición y software informático. En ambos contextos, el espectro resultante presenta la disposición de los niveles de vibración según sus frecuencias (Palomino, 2007, p33). En la figura 12 se evidencia la aplicación de la integral de Fourier.

Figura 12

Aplicación de la Integral de Fourier



Nota. Fuente: Palomino (2007, pág. 93).

La cantidad de líneas utilizadas para calcular el espectro se puede entender como el número de filtros aplicados al ligado de datos digitales. En la Figura 12 se aprecia en la parte superior el resultado de la Transformación de Fourier, que muestra un espectro simétrico en relación al eje vertical. En otras palabras, la parte del espectro correspondiente a las frecuencias positivas es idéntica a la parte correspondiente a las frecuencias negativas.

Sin embargo, en contraste, se puede notar en el gráfico inferior de la Figura 12 que la simetría del espectro ocurre con respecto a la mitad del total de muestras discretas, es decir $N/2$. Esto implica que solo la primera mitad del espectro obtenido mediante la FFT será visible en el dispositivo de medición. En otras palabras, por el momento $N/2$ es la cantidad de líneas que se manifestarán en el espectro, lo que también equivale al número de filtros a través de los cuales se ha procesado la señal temporal digitalizada.

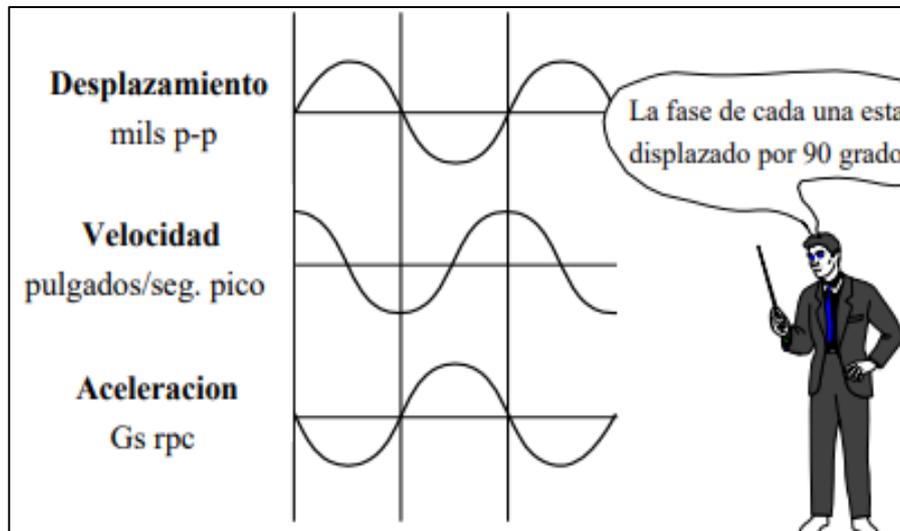
2.1.13 Unidades de vibración

a) Desplazamiento, velocidad y aceleración

Se considera la medida del desplazamiento de un objeto en vibración como una indicación de la anchura de su movimiento oscilante. Además del desplazamiento que varía, un objeto en vibración exhibirá también una velocidad que cambia y una prontitud inconstante. La velocidad se describe como la variación de la distancia respecto al tiempo, en el sistema inglés se suele medir en IPS. La aceleración se precisa como la tasa de permuta en la velocidad, y en el sistema inglés se expresa en unidades de "g," que representa la aceleración promedio correspondida a la gravedad en la zona terrestre.

La figura 13 se muestra la unidad de amplitud de estado y campo, el cual representa un sistema de análisis de señales vibratoriales en maquinaria industrial.

Figura 13
Unidades de Amplitud

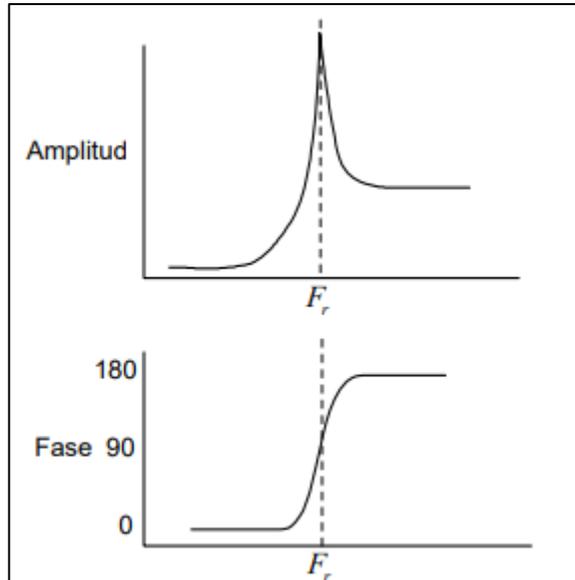


Nota. Fuente: White (2010, pág. 22).

b) Resonancia

La resonancia representa una etapa de funcionamiento en el cual una periodicidad de estímulo se halla en proximidad de una periodicidad natural inherente a la distribución del aparato. Una periodicidad natural es aquella en la cual una distribución vibrará si se la perturba y luego se la libera. Por lo general, una distribución típica posee múltiples periodicidades naturales. Durante la anomalía de la resonancia, los horizontes de vibración resultantes pueden ser notablemente elevados y, en consecuencia, tienen el potencial de ocasionar daños de manera rápida y significativa, tal como se muestra en la figura 14. (White, 2010).

Figura 14
Resonancia de Frecuencias críticas



Nota. Fuente: tomado de White (2010, pág. 30)

c) Sensibilidad

La sensibilidad de un sensor se determina como la mínima entrada requerida para generar una salida perceptible. La relación entre el sensor y el concepto de transductor es estrecha, ya que un sensor perpetuamente emplea un transductor. La diferencia clave entre un transductor y un sensor radica en que el sensor no solo convierte la variable física medida a otro dominio, sino que también proporciona información útil que puede ser aprovechada por un sistema de medición. En resumen, un sensor es un dispositivo de entrada que genera una salida manipulable que refleja la variable física medida (Corona y otros, 2014).

2.1.14 Efectos y consecuencias de la falla

Los resultados de un error se entienden como la manera en que el error se presenta; mejor dicho, afecta al sistema cuando ocurre un fallo en el equipo o activo, ya sea en un punto específico o en otra parte del sistema. Estas manifestaciones pueden incluir, por ejemplo, cambios en los niveles (aumento o disminución), variaciones de temperatura (mayor o menor), activación de signos, alarmas o mecanismos de seguridad, etc. Asimismo, se medita los síntomas asociados a la falla, como ruidos o incremento de vibración. Además,

se evalúan las repercusiones en la producción que se asemejan al tiempo requerido para solventar el fallo (Aguilar y otros, 2010).

2.1.15 Análisis fundamental de Causas de Fallas.

Con el fin de obtener un diagnóstico altamente preciso de las dificultades presentes en una máquina giratoria, resulta esencial realizar un análisis absoluto del signo en tanto en el ámbito de la temporalidad como en el de la frecuencia. Una vez que se ha obtenido la representación de frecuencia y el espectro, es viable identificar una variedad de dificultades comunes que pueden surgir en máquinas rotatorias (Luque Sevincha, 2023).

2.1.16 Identificación de modo de fallas

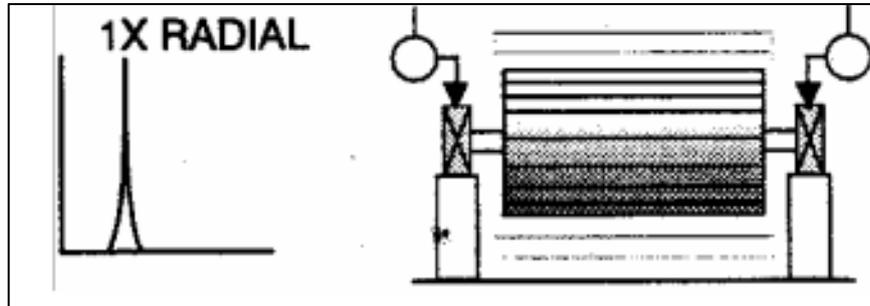
Una forma de falla se puede precisar como la manera en que un elemento derrocha su cabida para realizar su función prevista. Cada tipo de fallo demanda una medida de mitigación o prevención adecuada. En el marco de la Administración del Riesgo, pueden dirigirse hacia descarríos en el proceso, factores humanos, entre otros. Alternativamente, en casos como el análisis de modos y efecto de fallas (AMEF), donde el propósito es elaborar un procedimiento de mantenimiento. Cada carácter de falla estará asociado a una actividad específica de sostenimiento (Aguilar y otros, 2010).

a) Desbalanceo

- **Estático:** La condición actual es estable y en fase. Sin embargo, debido al desequilibrio, la amplitud aumenta proporcionalmente a la velocidad y se concentra por debajo de la frecuencia crítica inicial del rotor. Esta situación se puede reprimir mediante la adición de un único contrapeso de equilibrio en un plano ubicado en el centro de gravedad del rotor (CG). En la figura 15 se observa una discrepancia de alrededor de 90 grados de fase entre las lecturas en los planos horizontal y vertical en cada cojinete.

Figura 15

Espectro Típico y relación de fase de desbalanceo

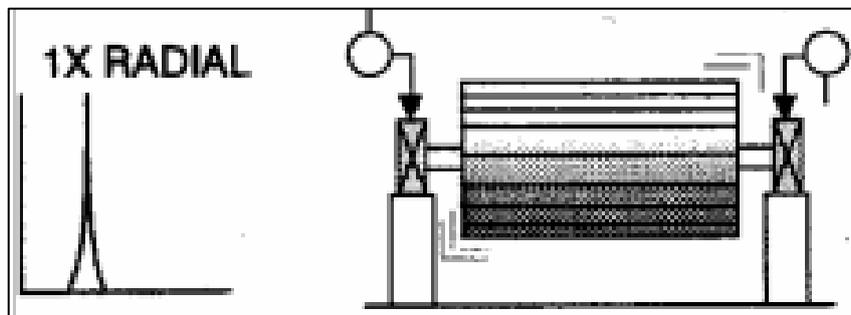


Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC)

- **Par de fuerzas:** Provoca un desbalanceo de 180 grados en la corriente a lo largo del mismo eje. La amplitud se incrementa al ritmo de la velocidad, especialmente por debajo del movimiento inicial del rotor. Esto puede resultar en una alta oscilación, tanto en dirección axial y radial, como se evidencia en la figura 16.

Figura 16

Espectro típico y relación de fase del balanceo de par de fuerzas

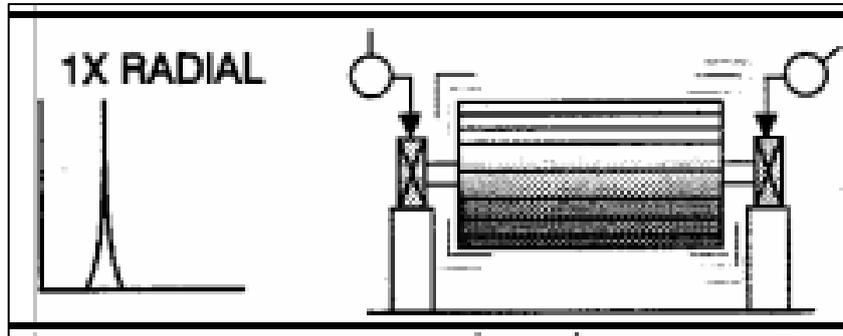


Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

- **Dinámico:** Este tipo de desequilibrio suele ser el resultado de una composición de desequilibrio paralizado y desequilibrio de dos de fuerzas. La discrepancia de fase radial entre los rodillos externamente e internamente puede estar en distintos puntos dentro de la clase de 0° a 180°. Este se evidencia en la figura 17.

Figura 17

Espectro típico y relación del desbalanceo

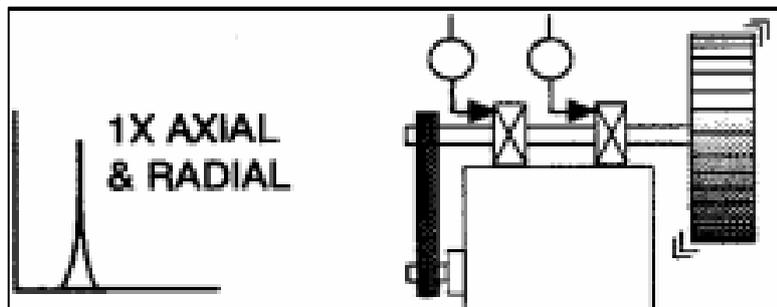


Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

- **Rotor en Voladizo:** Causa una alta variación vibracional en las direcciones axiales y radiales; poseen desbalances detenidos y de par de fuerzas, los cuales requieren de corrección, de los cuales el peso frecuentemente tiene que ser situado en dos planos para compensar dos desequilibrios, el paralizado y el par de potencias, como se evidencia en la figura 18.

Figura 18

Espectro típico y relación de fase del desbalanceo rotor en voladizo



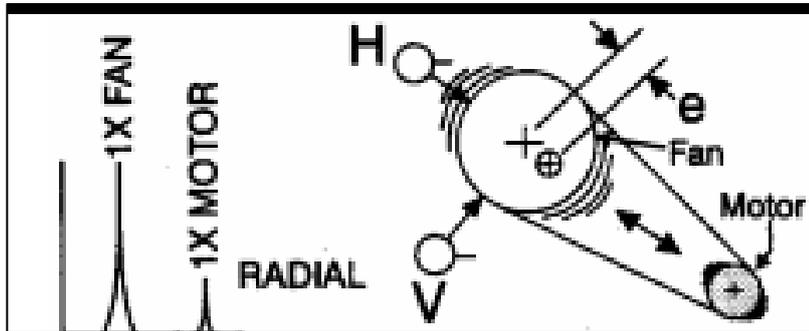
Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

b) Rotor excéntrico

La extravagancia se produce cuando el centro de revolución se encuentra afuera de la línea central geométrica de un componente, como un engranaje, una polea, un rodillo o la armadura de un motor, entre otros. La vibración más significativa ocurre a una frecuencia igual a 1x la velocidad de rotación (RPM) del mecanismo excéntrico, en una orientación que sigue la línea que conecta el centro de ambos mecanismos como se muestra en la figura 19.

Figura 19

Espectro típico y relación de fase del rotor excéntrico



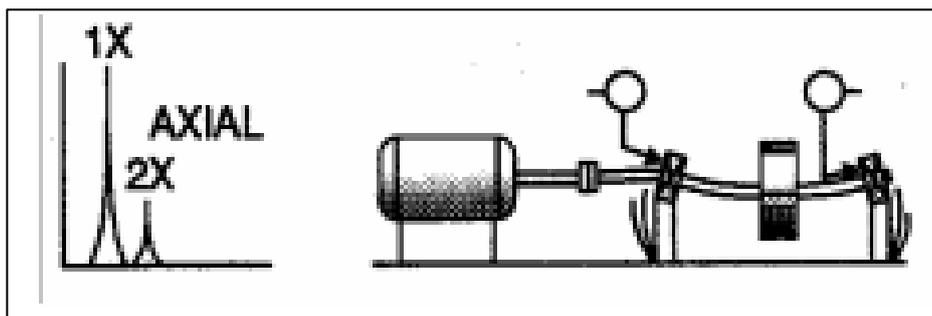
Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

c) Eje doblado

Los problemas derivados de un eje acodado generan una oscilación axial significativa en un componente de la máquina, con una diferencia de fase axial que tiende a aproximadamente 180 grados. La vibración predominante se produce principalmente a una frecuencia de 1X si la deformación del eje se encuentra cerca del centro del mismo. Sin embargo, si la curvatura se localiza cerca del acople, la vibración predominante se manifiesta a una frecuencia de 2X, como se evidencia en la figura 20.

Figura 20

Espectro típico y relación de fase del eje doblado



Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

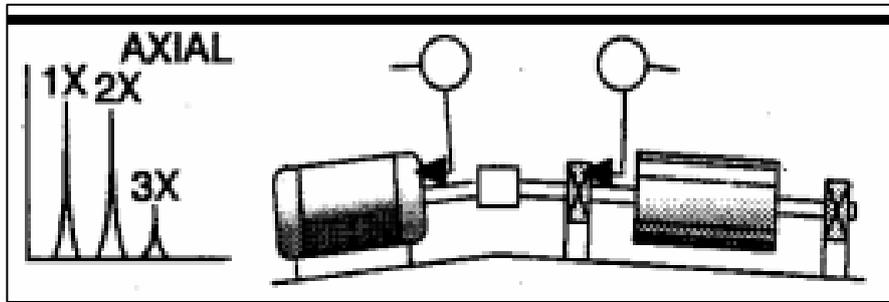
d) Desalineación

Angular: Se distingue por una vibración axial notable, que suele estar desfasada en 180 grados a través del ajuste. Normalmente, esta oscilación axial se encuentra

en 2XRPM y 1XRPM, pero no es infrecuente que cualquiera de estas frecuencias (1X, 2X o 3X) sea predominante en la figura 21.

Figura 21

Espectro típico y relación de fase, desalineación angular.

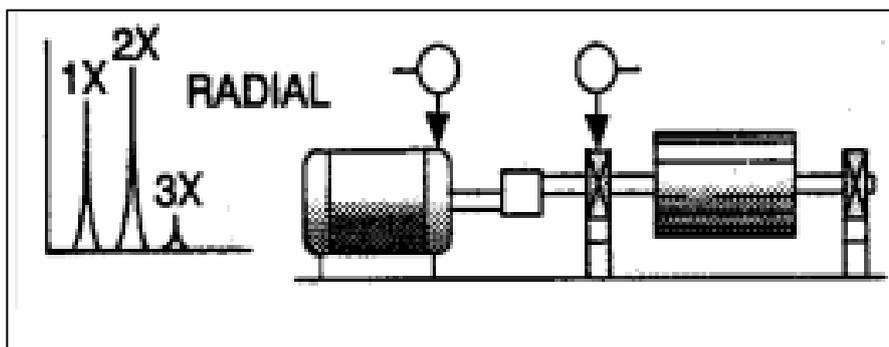


Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

Paralela: De acuerdo a la figura 22, se muestran síntomas de vibración que se asemejan a los de la vibración angular; no obstante, se caracterizan por una intensa oscilación radial que suele estar desfasada en aproximadamente 180 grados a través del acople. Por lo general, no se observa un acrecentamiento demostrativo en el nivel de ruido en el espectro de frecuencias.

Figura 22

Espectro típico y relación de fase de desalineación paralela

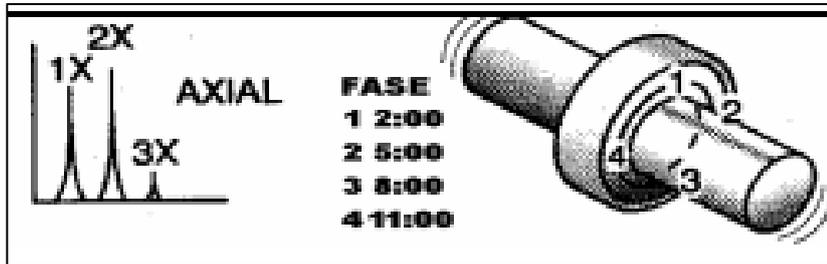


Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

Rodamiento Inclinado sobre el eje: Produce una oscilación axial notable, y puede ocasionar una tendencia torsional con una permuta de fase cercano a 180 grados, ya sea de arriba hacia abajo o de un lado a otro, cuando se calcula en la orientación axial dentro del mismo caparazón del rodillo. Esto se evidencia en la figura 23.

Figura 23

Espectro típico y relación de fase, rodamiento inclinado sobre el eje



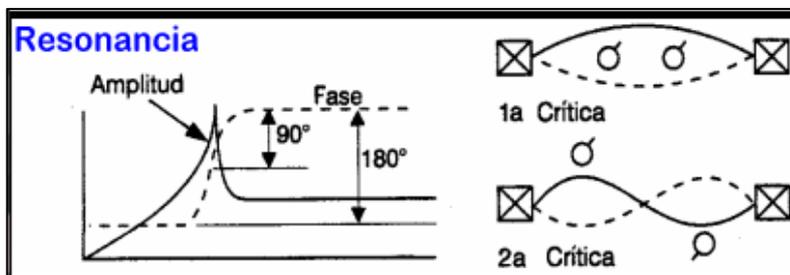
Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

e) Resonancia

Sucede cuando una frecuencia externa se iguala con una frecuencia natural del sistema, lo que provoca un aumento significativo en las amplitudes, pudiendo llevar a una falla temprana o, en casos extremos a una falla catastrófica, evidenciado en la figura 24.

Figura 24

Espectro típico y relación de fase de resonancia



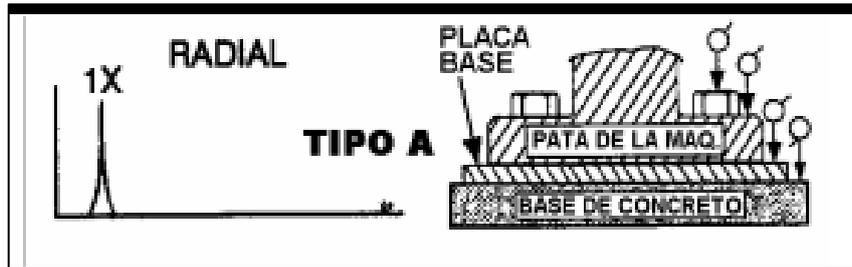
Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

f) Soltura Mecánica

- **Tipo A:** Esta situación se origina debido a la presencia de holguras, tal como se muestra en la figura 25 debilitamiento estructural en la base de la máquina, la placa, el soporte o la cimentación, así como desprendimiento de los pernos que aseguran la base.

Figura 25

Espectro típico y relación de fase en soldadura mecánica, Tipo A

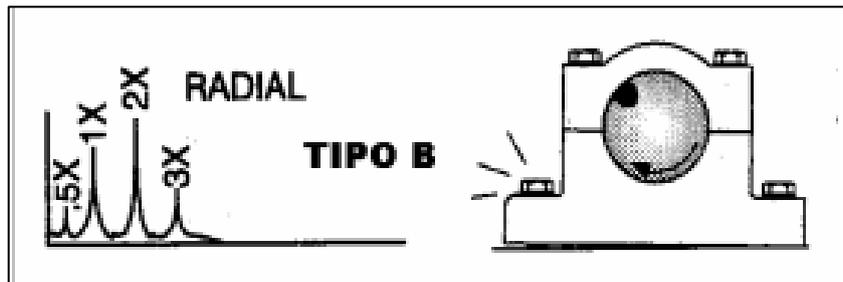


Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

- **Tipo B:** Suele ser el resultado de factores como el aflojamiento de los pernos del sostén, según se muestra en la figura 26; la presencia de fisuras en la organización del bastidor.

Figura 26

Espectro típico y relación de fase en soldadura mecánica, Tipo B

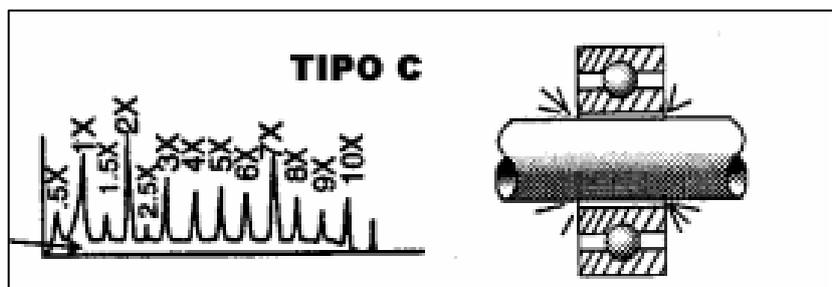


Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

- **Tipo C:** Se produce debido a una mala ajuste entre las partes componentes, que puede ser causado por el desgaste de un recambio en su caja, como se muestra en la figura 27 dentro de un espacio descomunal en la camisa o en las partes rodantes del rodillo, o incluso por un eje suelto.

Figura 27

Espectro típico y relación de fase en soldadura mecánica Tipo C.

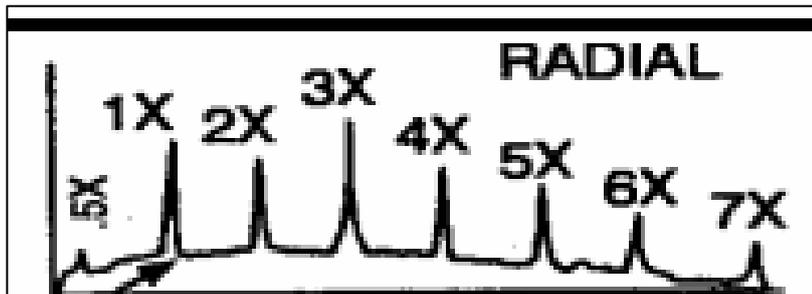


Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

g) Cojinetes

Problemas por desgaste o juego: Estas vibraciones se originan debido a la existencia de complejas series de armónicas relacionadas con la celeridad de trabajo. Cuando los cojinetes están desgastados, figura 28, se observan amplitudes verticales significativamente más altas en comparación con las horizontales.

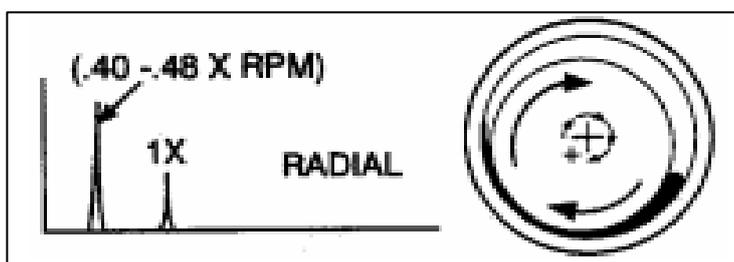
Figura 28
Solturas de elevación por desgaste o juego



Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

Inestabilidad por remolino de aceite: Se manifiesta en el rango de 40 a 48 veces la velocidad de rotación 40-48XRPM (figura 28), y a menudo es de considerable magnitud. Esta vibración se relaciona con la formación de una película de aceite, en la cual las variaciones en los contextos estándar de funcionamiento, como el ángulo de habilidad y el radio de extravagancia, provocan que una llave de aceite ejerza presión sobre el eje dentro del cojinete.

Figura 29
Roce por fricción del rotor, remolino de aceite.



Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

Inestabilidad por latigazo de aceite: Se produce cuando la máquina opera a una velocidad igual o superior a 2 veces la frecuencia crítica del rotor, lo que genera una oscilación descomunal que la cutícula de aceite no puede amortiguar adecuadamente.

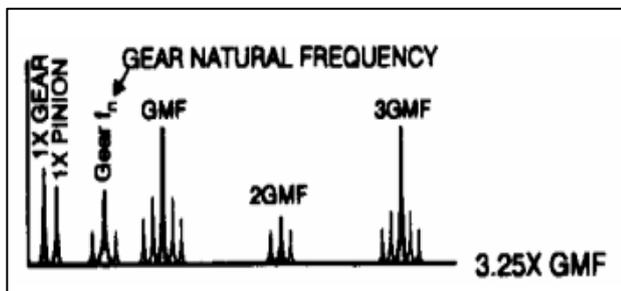
h) Engranajes

Espectro Normal: El espectro típico del engranaje como del piñón presentan amplitudes reducidas y no generan excitación en las frecuencias naturales de los engranajes.

Desgaste de Diente: La exaltación de la periodicidad natural del embrague es la clave fundamental para el desgaste del diente, donde ocurren grandiosas extensiones tanto a 2X GMF como a 3X GMF (figura 30), aun si la anchura de GMF es admisible.

Figura 30

Desgaste de dientes por fricción.



Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

Carga del Diente: Suelen ser altamente sensibles a las variaciones en la carga y, en ocasiones, amplitudes elevadas de la frecuencia de engranaje (GMF) no indican precisamente una dificultad, especialmente cuando las periodicidades de banda lateral se mantienen en niveles bajos y no se estimulan las periodicidades naturales de los engranajes.

Excentricidad del engranaje u juego entre los dientes: Frecuentemente, la presencia de bandas laterales con amplitudes significativas alrededor de las armónicas de la frecuencia de engranaje presenta la posibilidad de excentricidad en los engranajes, juego o ejes que no son análogos, lo que permite que el giro de un engranaje influya en la celeridad de revolución del otro.

2.1.17 Severidad de vibración según el tipo de máquina.

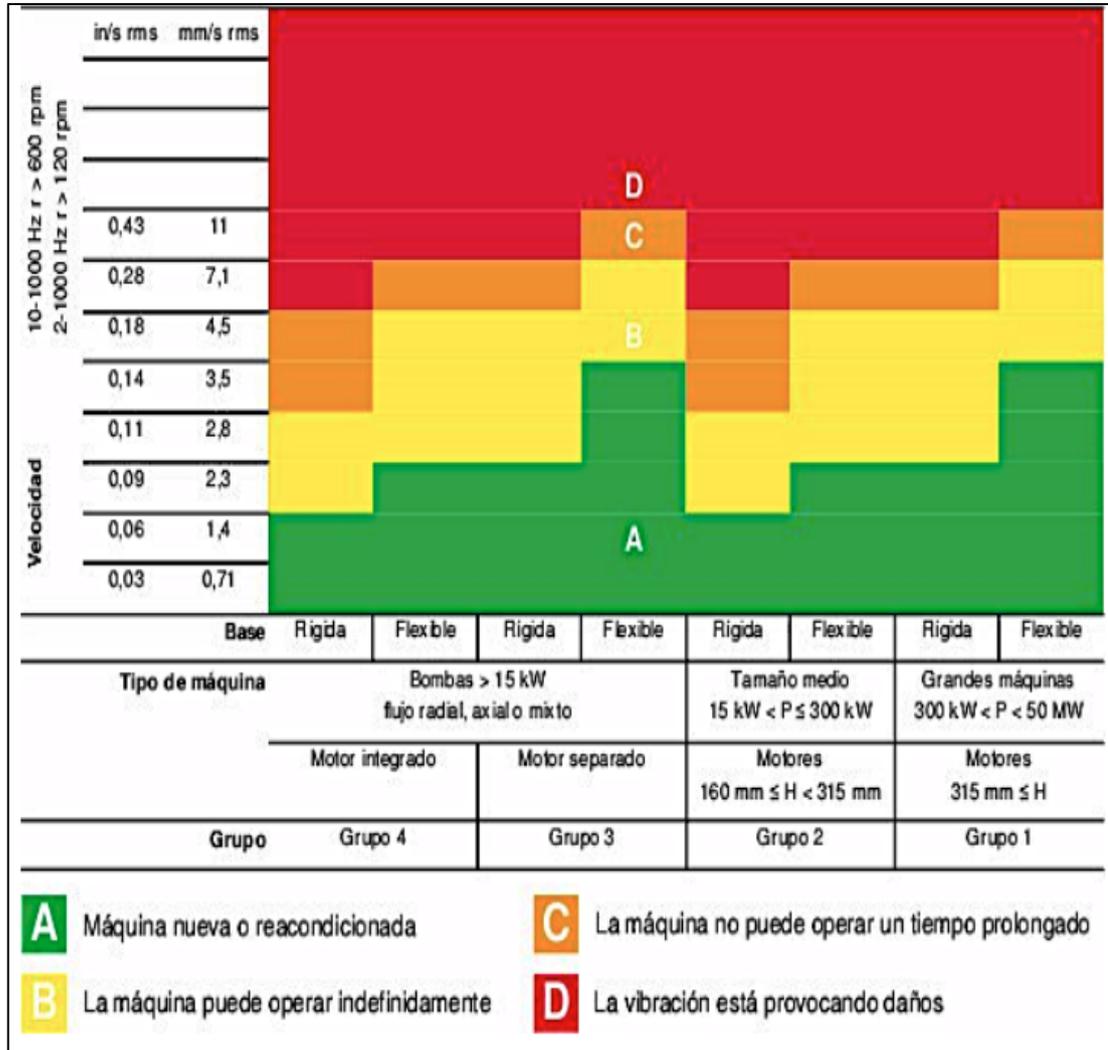
Dado que existen notables disparidades en el esbozo, las formas de apoyo y las distribuciones de soporte de las máquinas, se hace necesario categorizarlas en grupos.

Estos grupos pueden incluir máquinas con ejes horizontales, verticales o inclinados, y pueden estar instaladas en columnas tanto rigurosos como dúctiles (rodesprex).

- **Categoría 1:** Máquinas giratorias de gran envergadura con una potencia preferente a 300 kW. Incluye aparatos eléctricos con una elevación de eje H mayor o pareja a 315 mm.
- **Categoría 2:** Máquinas giratorias de tamaño mediano con una potencia que oscila entre 15 kW y 300 kW. En este grupo se encuentran aparatos eléctricos con una elevación de eje que varía de 160 mm a 315 mm.
- **Categoría 3:** Bombas con impulsores de variadas torceduras y motores independientes con una fuerza superior a 15 kW.
- **Categoría 4:** Bombas con impulsores de variadas torceduras y motores integrados con una potencia preferente a 15 kW.

Figura 31

Severidad de vibración



Nota. Fuente: Tomado de (PTSAC, 2023)

2.1.18 Molino

Durante más de cien años se ha tratado el tema de la reducción de tamaño mediante la consideración de la energía empleada por los aparatos de molienda y trituración. Esto está intrínsecamente vinculado al alto consumo energético necesario para llevar a cabo estos procesos. Sin embargo, el equipo utilizado para la trituración y molienda de minerales no cuenta con una estructura organizativa que le admita rendir de manera eficiente la energía entregada para reducir el tamaño de las partes minerales (Guzman Restrepo, 2023).

2.1.19 Tipos de molinos

a) Molino De Bolas Para Molienda

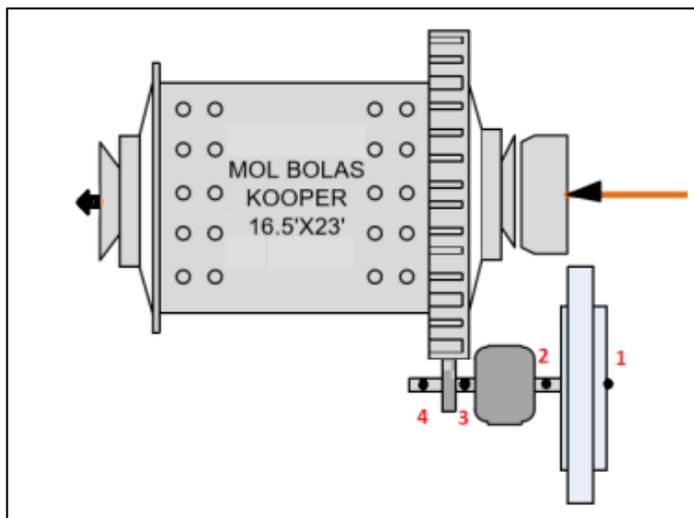
Los trituradores de bolas presentan una configuración cilíndrica, aunque existen algunas variantes que incorporan extremos cónicos. En los casos en que estos molinos tienen extremos cónicos, los ángulos típicos son de 60 y 30 grados.

Características De Los Molinos De Bolas

- Se emplean esferas como agente de molienda.
- Comúnmente se opta por realizar el proceso de molienda en condiciones húmedas, lo que implica la presencia de un cierto porcentaje de contenido acuoso en el material.
- Las esferas de molienda deben ser cuidadosamente seleccionadas previo a un cálculo adecuado.
- El tamaño de las esferas varía, y a régimen que el tamaño de la alimentación acrecienta, se observa una mayor predominancia de esferas de mayor diámetro. Lo contrario ocurre cuando el tamaño de los granos en la alimentación es menor.
- Típicamente se aplica en procesos de trituración primaria y secundaria.

Figura 32

Molino de Bolas, Kooper



Nota. Fuente: tomado de (PTSAC, 2023)

b) Molino De Barras Para Molienda

Estos molinos presentan una estructura de forma cilíndrica. La actividad de molienda en esta categoría de molinos se ejecuta mediante los procedimientos de fractura, fricción, presión y abrasión. En la fase inicial, el molino carga con barras en función de las extensiones del molino y el tipo de materia que será molido. Posteriormente, se pone en movimiento, lo que inicia los procesos de fractura dentro de la máquina. Los trituradores de barras son típicamente utilizados cuando se anticipa que el resultado de la trituración será de gran tamaño y no contendrá lodo.

Características de los Molinos de Barras

- Se emplean barras como medio de molienda.
- La igualdad entre la longitud y el diámetro de los molinos de barras suele ser de aproximadamente 3-1.
- Se opta en su mayoría por realizar la molienda en condiciones húmedas, donde el material a moler se mezcla con agua.
- El calibre de las barras varía considerablemente, abarcando desde barras gruesas hasta más delgadas, con diámetros que van desde 3.8 cm hasta 10 cm.
- Cuando la alimentación consiste en material grueso, prevalecen las barras de mayor diámetro, mientras que en el caso contrario se emplean las de menor diámetro.

2.1.20 Tipos de fallas en el molino de bolas koppers 16.5 x 23

Al igual que otras maquinarias, el molino 20x30 puede llegar a presentar fallas determinadas que pueden afectar su funcionamiento y productividad. Estas fallas pueden ser potenciales o funcionales. En el caso de la primera, es una circunstancia, en la cual es detectada, una degradación leve (medible) pero da cumplimiento a la función inherente, lo que significa que no afecta del todo la producción generada por la maquinaria. Generalmente esas fallas no son percibidas por los operarios, aunque juegan un papel fundamental en lo

que respecta al mantenimiento predictivo y las estrategias que le estructuran (Larrea y otros, 2020).

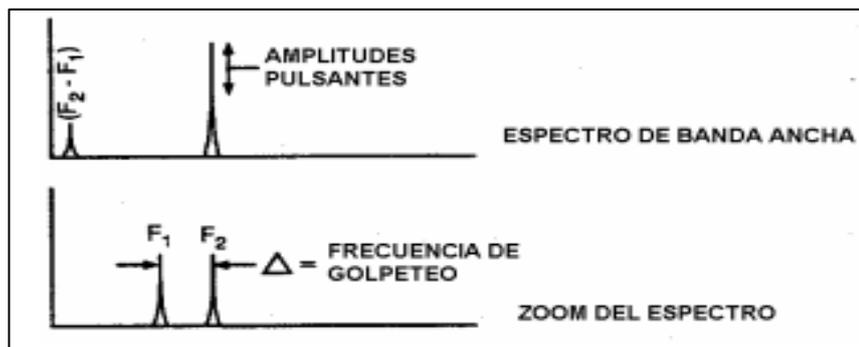
En lo que concierne a la falla funcional, la maquinaria deja de dar cumplimiento a las funciones inherentes, aunque no necesariamente deja de producir totalmente. Entran en juego en este proceso los denominados requerimientos de desempeño, los cuales son el resultante de la incapacidad de los equipos para alcanzar el tope de desempeño proyectado. Se representan con un síntoma o episodio observable por los operadores y responsables del mantenimiento (Larrea y otros, 2020).

a) Variaciones de Amplitudes al arranque

La periodicidad de impacto es la consecuencia de periodicidades colindantes que se sincronizan y desincronizan entre sí, alcanzando su vibración máxima cuando la onda de tiempo de una frecuencia (F_1) se alinea en período con la frecuencia de tiempo de la otra periodicidad (F_2), de esta manera aumenta la amplitud de acuerdo a las pulsaciones, como se muestra en la figura 33.

Figura 33

Amplitudes y pulsaciones



Nota. Fuente: tomado de (ADEMINSAC).

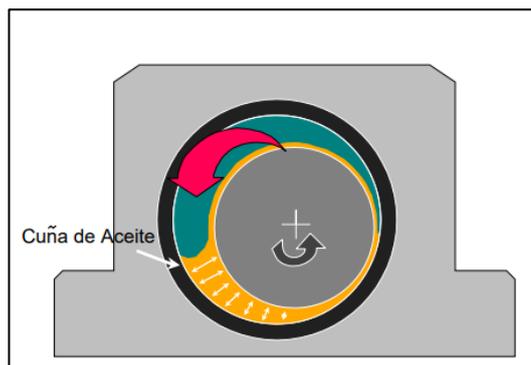
b) Mala lubricación del sistema de transmisión

Se refiere a una situación en la que se experimenta una vibración intensa entre las frecuencias $0.38x$ y $0.48x$. Esta vibración nunca se presenta exactamente en $0.5x$, sino que siempre ocurre un poco por debajo de esa frecuencia. Esta anomalía se origina debido a un juego descomunal y a una carga circular leve como se muestra

en la figura 34, lo que provoca el acaparamiento de una cutícula de aceite y fuerza al pivote a desplazarse dentro del rodillo a falta de la mitad de las RPM. El fenómeno de remolino de aceite constituye un problema grave que requiere corrección en cuanto se detecta, ya que puede degenerar rápidamente hasta el punto en que se produce contacto metálico directo en el rodamiento (White, 2010, p.112).

Figura 34

Remolino de aceite



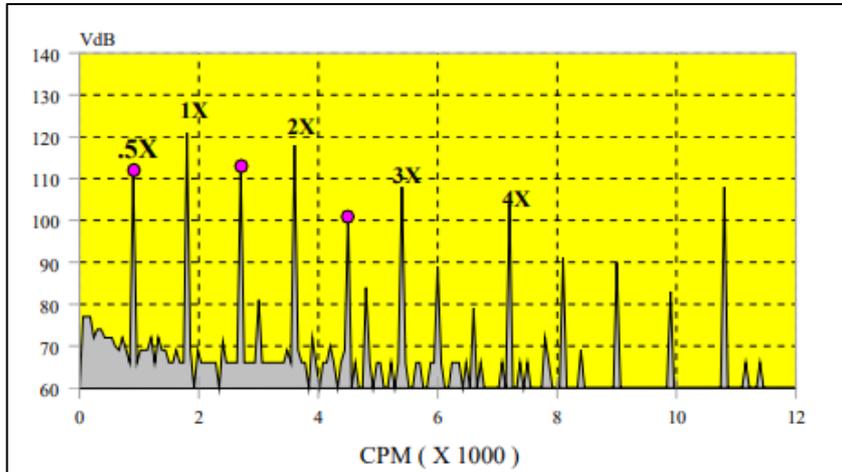
Nota. Fuente: tomado de White (2010, pág. 112)

c) Holgura mecánica

La presencia de juego mecánico resulta en la manifestación de armónicos a frecuencia fundamental ($1x$), y en situaciones más graves se pueden identificar diferentes frecuencias de holguras ($0.5x$), ($2x$), ($4x$). En ocasiones, la causa de estos componentes semiordenados puede ser el ruido producido por el roce del rodamiento en su alojamiento. En casos extremos de holgura es posible incluso observar componentes de periodicidad a un tercio y un cuarto de la periodicidad fundamental, tal como se muestra en la figura 35.

Figura 35

Holgura mecánica



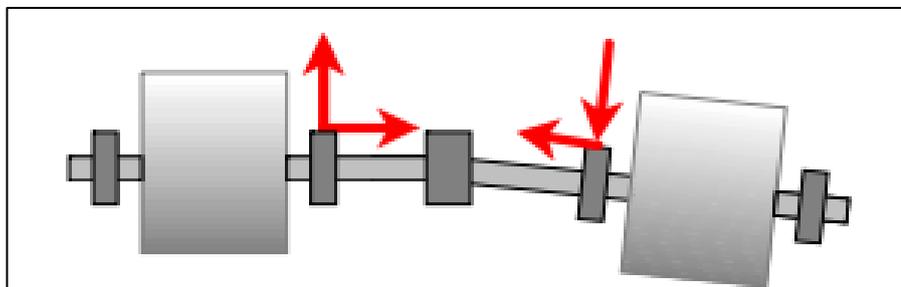
Nota. Fuente: tomado de White (2010, pág. 113).

d) Desalineamiento angular

La falta de alineación angular resulta en la generación de un momento de torsión en cada eje, lo cual origina una vibración significativa en la frecuencia fundamental (1x) y una vibración algo menor en el doble de la frecuencia fundamental (2x) en la orientación axial en uno y otro rodamiento; esta vibración tiene una fase opuesta. Además, también se observarán niveles relativamente intensos en las direcciones radial y/o transversal en las frecuencias 1x y 2x, pero con una fase similar tal como se muestra en la figura 36.

Figura 36

Desalineamiento angular



Nota. Fuente: tomado de White (2010, pág. 110)

2.1.21 Desarrollo de Sistemas

Nos referimos al proceso de construcción de sistemas cuando empresas diseñan software personalizado para atender las necesidades específicas de sus clientes. En ocasiones, estas empresas poseen una especialización en un sector particular, como telecomunicaciones, control industrial o sistemas integrados. Además, pueden contar con conocimientos técnicos especializados o dominar diversas tecnologías. Otras no se especializan en ningún área de negocio, y se dedican a desarrollar software de administración de información en general. Los miembros de los grupos de desarrollo se agrupan en torno a un proyecto de acuerdo a sus necesidades y a los roles que cada persona puede desempeñar (Pantaleo & Rinaudo, 2015).

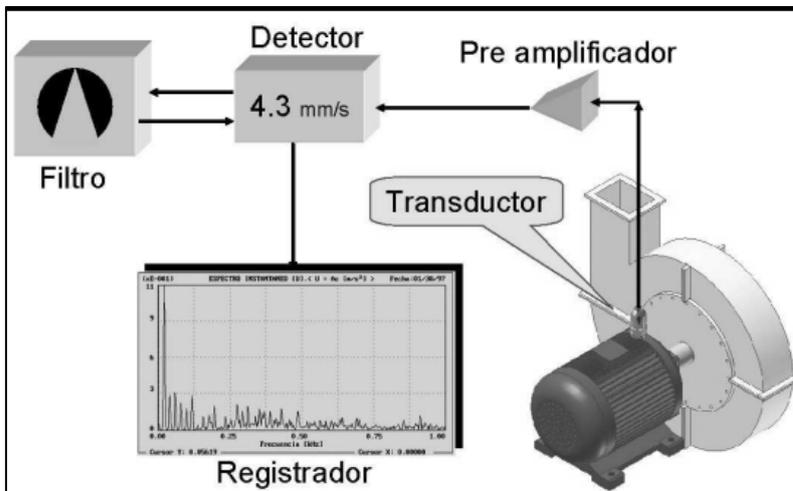
2.1.22 Transductor

Un transductor es un aparato concebido para adquirir energía de un sistema y transferirla, ya sea en forma similar o diferente, hacia otro sistema. Su objetivo es que en la salida del transductor se presente la propiedad relevante de la energía inicial que se introdujo. Por lo tanto, la señal eléctrica emitida por el sensor requerirá ser procesada por el preamplificador correspondiente antes de que pueda ser interpretada por el detector-indicador. Este último dispositivo mostrará la información en formato digital o analógico. Por supuesto, para realizar un análisis basado en periodicidades se necesitará la inclusión de un filtro y un dispositivo de registro gráfico. (Palomino Marín, 2007).

Ese proceso se puede visualizar en la figura 37. Estos elementos, trabajando conjuntamente con el detector-indicador, se encargarán de analizar la señal vibro acústica para separarla en sus diferentes amplitudes y frecuencias, lo que resultará en la representación gráfica de las vibraciones en forma de espectro, como es habitual.

Figura 37

Diagrama de funciones de vibraciones



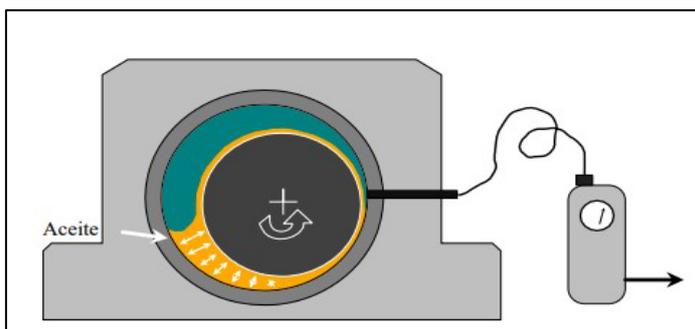
Nota. Fuente: Tomado de Palomino (2007, pág. 40).

2.1.23 Sensores de vibración

Estos sensores son aparatos que generan señales eléctricas que son análogas a los movimientos vibratorios a los cuales están sujetos. En la figura 38 se muestra el caso del sensor de proximidad. Se trata de una unidad de instalación fija que requiere un amplificador para acondicionar la señal y producir un voltaje de salida que guarda proporción con el trecho entre el transductor y el extremo de la flecha (White, 2010, pág. 53)

Figura 38

Sensor de proximidad



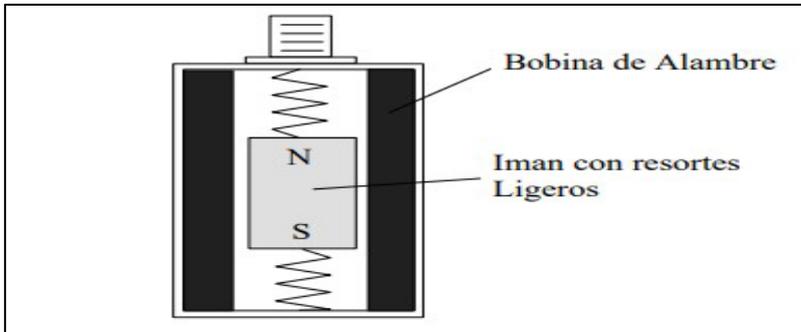
Nota. Fuente (White, 2010)

El sensor de prontitud reside de una bobina alambrada y un imán puestos de representación que, al movimiento del cárter, el imán persiste inactivo por inercia. En la figura 39 se presenta un ejemplo de sensores de velocidad. “La interacción entre el campo

magnético y la bobina produce un estándar que es directamente igual a la celeridad de la tendencia relativa.” (White, 2010, pág. 54)

Figura 39

Sensores de velocidad

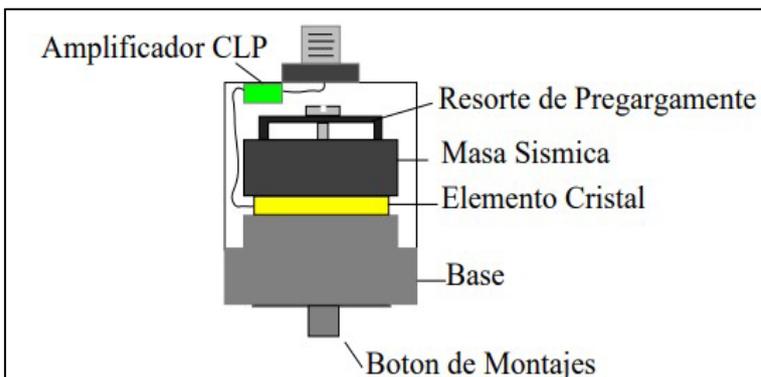


Nota. Fuente (White, 2010, pág. 54)

El acelerómetro es un transductor modelo para el cálculo de vibración en máquinas. La masa sísmica se encuentra unida a la base a través de un eje axial (figura 40), que descansa sobre un resorte circular. Al mover el acelerómetro en una dirección vertical, la fuerza necesaria para desplazar la masa sísmica se encuentra respaldada por el componente activo. (White, 2010).

Figura 40

Sensores de velocidad



Nota. Fuente (White, 2010, pág. 55)

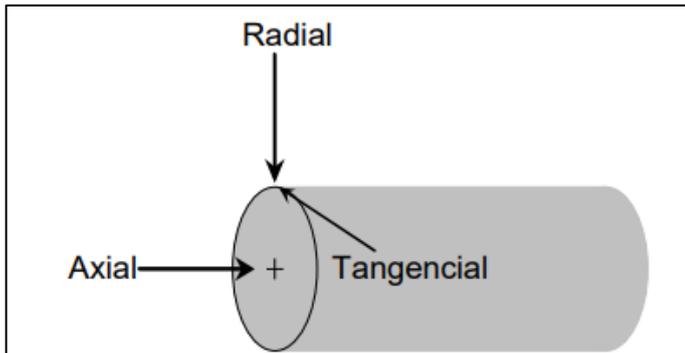
2.1.24 Mediciones triaxiales

Para facilitar la identificación de problemas en máquinas, resulta altamente beneficioso obtener datos de vibración en tres direcciones desde cada punto de medición como se muestra en la figura 41. Estas direcciones son conocidas como axial, radial y tangencial.

La dirección axial es paralela al eje de la máquina, la dirección radial se extiende desde el transductor hacia el foco del eje, y la dirección tangencial es perpendicular a la dirección Radial, tangente al eje (White, 2010).

Figura 41

Alineación de ejes de vibración



Nota. Fuente (White, 2010).

2.1.25 Sensores mono axiales

Las mediciones tridimensionales o de tres ejes, se utilizan para evaluar la prontitud y la agitación en diversos campos. La distinción reside en que un único dispositivo puede medir paralelamente la aceleración en los tres ejes, en contraste con las mediciones mono direccionales que solo ofrecen una coordenada. Los rangos de medición pueden variar, y una ventaja destacable es la posibilidad de contar con diferentes rangos para los distintos ejes de medición, basados en la tecnología empleada, norma ISO 10816.

Esta regulación define condiciones y métodos particulares para el cálculo y análisis de la oscilación mediante cálculos ejecutados en partes estáticas de las máquinas. La evaluación corriente se fundamenta en la monitorización operativa y ensayos de ratificación, diseñadas principalmente para garantizar un funcionamiento confiable y duradero de la máquina. Esta pauta sustituye a las ISO 2372 e ISO 3945, las cuales fueron revisadas técnicamente. Este estándar consta de cinco secciones.

- Sección 1: Instrucciones corrientes.
- Sección 2: Generadores de vapor y con capacidades superiores a 50 MW y celeridades de operación típicas de 3600, 3000, 1800 y 1500 rpm.

- Sección 3: Equipos industriales con potencia nominal superior a 15 kW y celeridades que oscilan entre 120 y 15000 rpm.
- Sección 4: Ligados accionados por motores de gas, exceptuando las utilizadas en aplicaciones aeronáuticas.
- Sección 5: Ligados de maquinaria en instalaciones de generación hidroeléctrica y bombeo.

2.1.26 Sistema de sensado y monitoreo online

De acuerdo con Salamanca et al. (2014), para implementar un sistema de sensado y monitoreo online se debe seguir la siguiente secuencia:

- En primer lugar, se necesitan módulos estáticos para supervisar el rendimiento de la maquinaria en diferentes puntos de funcionamiento. Para lograrlo, se realizan tarjetas con la finalidad de dirigir la información en el lugar de trabajo.
- En un centro externo se coloca un módulo coordinador cuya función principal es recibir los datos provenientes de estos sensores, y luego conectarlos a una ficha de desarrollo. Esta tarjeta se encomienda del proceso y la interpretación de los datos de cada sensor.
- Es importante destacar que el módulo debe recibir alimentación de una batería YSD 998 con una entrada de voltaje de 12 V. La unión entre la batería y el módulo se ejecuta por un Jack a miniUSB.
- Se instala un sistema de transmisión inalámbrica y un microcontrolador, que se encargará del monitoreo para activar las alarmas.

2.1.27 Software MHM

Es el programa informático encargado de analizar la señal transmitida por el módulo CSI 2140 a través de una conexión en línea. Cuenta con una interfaz amigable para el beneficiario, en la cual es posible llevar a cabo análisis en distintos aspectos como frecuencia, tiempo y transitorios. Adicionalmente, dispone de un sistema para generar informes habituales y un administrador de sobresaltos que configura, ejemplifica e inspección

de diversos tipos de alertas definidos en el sistema. Ofrece una amplia variedad de representaciones gráficas que incluyen gráficos de frecuencia, tiempo, diagramas de Nyquist y Bode. También permite combinar estos gráficos, generar bases de datos y exportarlas en formato XML. Finalmente, tiene la capacidad de analizar una amplia gama de variables que incluyen celeridad, velocidad, frecuencia, temperatura, voltaje, corriente, flujo, presión, entre otras. Además, es compatible con todos los productos predictivos de CSI-EMERSON y puede integrarse con ellos. (Luque Sevincha, 2023)

2.1.28 Analizador CSI 2140 Emerson

El adaptador CSI 2140 no requiere configuración adicional para su utilización, a excepción del programa de balanceo. En este último, para impulsar la opción 'mux', es necesario utilizar el dispositivo de cuatro señales proporcionado por el CSI 2140. Para acceder a los demás dispositivos, simplemente gire el dispositivo y conecte el CSI 2140 utilizando el cable de interfaz conveniente. Si se desea utilizar la funcionalidad de múltiples canales, es necesario configurar la cuantía de ingresos en el menú de configuración de ingreso de cada programa, asignar un sensor a cada entrada y seguir una unión como se muestra a continuación. Para las rutas, es esencial conformar los ingresos y los sensores en el software AMS Machinery Manager (Emerson, 2016).

Al usar el CSI 2140 en un área peligrosa, tener en cuenta lo siguiente:

- Es necesario utilizar el puerto USB exclusivamente en zonas no peligrosas.
- El uso del puerto Ethernet debe limitarse a áreas no peligrosas.
- No se debe emplear el sensor CSI 430 SpeedVue en áreas consideradas peligrosas.
- La recarga y/o sustitución de la batería debe llevarse a cabo únicamente en áreas seguras, sin riesgos.
- Si se detecta algún signo de daño en el equipo, se recomienda devolverlo para su resarcimiento.
- Si se prevé dejar el terminal sin supervisión en exteriores, es recomendable guardar el equipo en un lugar sombreado o con la pantalla LCD hacia abajo.

- Se debe proporcionar protección a la pantalla táctil frontal para evitar efectos.
- Las salidas son consideradas interiormente indudables si se realizan de acuerdo con el plan D25671 para su uso en plazas comprometidas de la zona 2, según las normativas ATEX/IECEX.
- Las justificaciones son consideradas interiormente inequívocas si se realizan según el plan D25639
- Para su uso en áreas peligrosas de división 2, clase I.

Figura 42

Analizador CSI 2140



Nota. Fuente: (Emerson, 2016).

- A. Tecla Inicio: Permite volver a la pantalla de inicio desde distintos programas.
- B. Tecla Reiniciar: Permite volver al menú principal dentro de un programa.
- C. Teclas de Función: Utilizadas para desplegar las elecciones del menú.
- D. Tecla Confirmar: Usada para elegir un menú o una opción.
- E. Tecla de Iluminación del Teclado: Activa la iluminación debajo de las teclas.
- F. Tecla de Iluminación de la Pantalla LCD: Ajusta la iluminación de la pantalla táctil del LCD.
- G. Tecla de Ayuda: Muestra el texto de auxilio relacionado con una tecla.

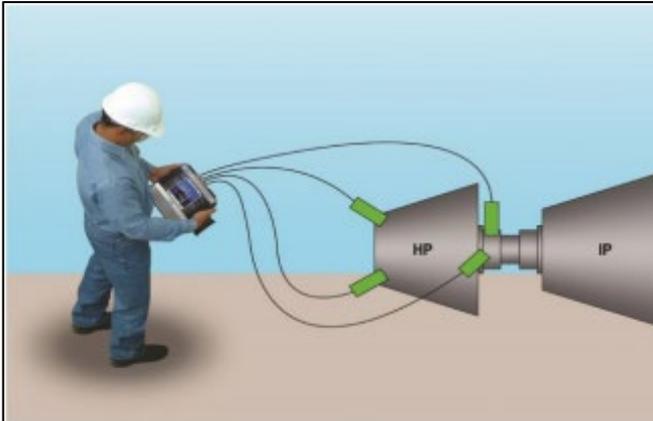
- H. Tecla de Encendido/Apagado: Enciende o apaga el analizador, o lo coloca en carácter de espera.
- I. LED de etapa de la batería: Se ilumina en verde si la batería está llena y en ámbar durante la carga.
- J. LED Indicador de estado: Parpadea en azul cada vez que se presiona una tecla u opción, pestañea en el modo de conservación de energía y persiste encendido constantemente en manera de espera.
- K. Teclas de Desplazamiento: Permiten agitar a través de los menús.
- L. Tecla Alternar: Prototipa una pantalla alternativa si está útil.
- M. Tecla Retroceder: Regresa al menú primordial dentro de un programa

De forma inalámbrica es posible transferir los datos recopilados en las rutas y las tareas de mantenimiento correctivo desde el campo al sistema AMS Machinery Health Manager, donde se analizan y se generan informes. AMS Machinery Manager permite la integración de datos provenientes de diversas tecnologías, como vibración, análisis de aceite, termografía y balanceo, todo en una única base de datos. Las alertas generadas por las máquinas en AMS Machinery Health Manager pueden exportarse automáticamente al sistema de Gestión del Rendimiento de Activos AMS, donde se combinan con alertas de otros activos de la planta, proporcionando una visión integral de la salud de la instalación. En conjunto, el sistema AMS 2140 y AMS proporcionan la inteligencia predictiva necesaria para mejorar la disponibilidad y la confiabilidad de la planta. (PTSAC, 2023).

El AMS 2140 ofrece la capacidad de recopilar datos de manera simultánea en cuatro canales, además de proporcionar información de fase, como se muestra en la figura 43. Esto permite obtener visualizaciones en tiempo real de la mayoría de las dificultades que logran germinar en maquinaria compleja.

Figura 43

Funcionamiento del analizador AMS 2140

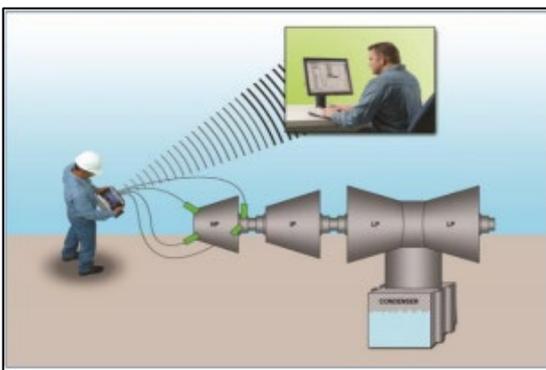


Nota. Fuente: Emerson. Tomado de: (PTSAC, 2023).

En la figura 44 se muestra la transferencia inalámbrica de datos de rutas del terreno hasta el analista en la oficina posibilita la ejecución simultánea de la recolección y el análisis.

Figura 44

Transmisión inalámbrica del Analizador AMS 2140



Nota. Fuente: Emerson. Tomado de: (PTSAC, 2023).

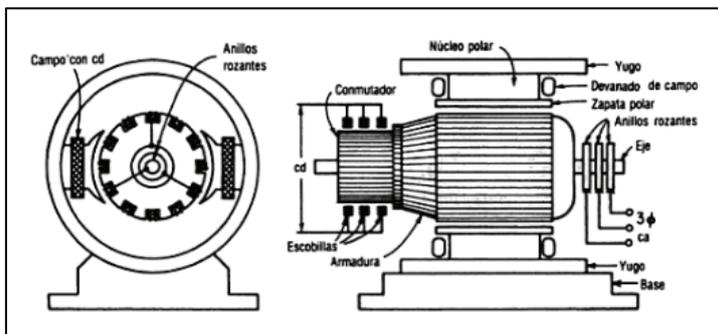
El AMS 2600, equipo RAC, tiene la capacidad de recolectar datos de vibraciones en una ruta predeterminada que pase por toda la planta. Es la pieza clave de los programas de mantenimiento provisorio en la actualidad. También ofrece pruebas de diagnóstico sofisticado de los activos con problemas, brindando monitorización las 24 horas del día, con respuestas cuantitativas (PTSAC, 2023).

2.1.29 MOTORES PARA C.A. SÍNCRONOS

Estos motores reciben su nombre por la coincidencia de la prontitud del rotor con la velocidad del campo sugestivo del estator. Los motores síncronos encuentran aplicación en maquinarias de considerables dimensiones que experimentan variabilidad en la carga, y requieren mantener una velocidad constante (Figura 45). Los motores síncronos representan máquinas sincronizadas empleadas para transformar energía eléctrica en potencia mecánica rotativa (Valenzuela, 2013).

Figura 45

Motor síncrono de tipo rotor liso



Nota. Fuente: Valenzuela (2013, pág. 26).

2.1.30 MOTORES PARA C.A. ASÍNCRONOS

El motor de corriente alterna trifásico, también reconocido como motor trifásico, es ampliamente utilizado en la industria. Este tipo de motor se encuentra en una variedad de máquinas herramientas como tornos y fresadoras, así como en otras aplicaciones donde se busca un motor resistente sin necesidad de regular su velocidad (Figura 46). No obstante, con los avances en electrónica de potencia, estos motores están siendo cada vez más empleados en situaciones que requieren controlar la velocidad, aprovechando sus capacidades mejoradas (Valenzuela, 2013).

Figura 46

Motor Trifásico jaula de ardilla



Nota. Fuente: Valenzuela (2013, pág. 51)

2.1.31 Principales indicadores de mantenimiento

El criterio de seguridad puede ser determinado como el grado de “confianza” que se posee en que una pieza o equipo cumpla la función que le corresponde en un tiempo determinado y bajo las condiciones operativas estándar. Una cierta garantía de confiabilidad viene dada por la inversión de capital en materiales óptimos, maquinarias de reemplazo, entre otros (Chávez Cadena y otros, 2020).

Por su parte, el criterio de disponibilidad es base fundamental del mantenimiento, y precisa como el régimen de confianza en que un régimen sometido a mantenimiento cumpla satisfactoriamente su función dentro del período de tiempo previamente establecido. Operativamente, la disponibilidad se representa como la participación de tiempo en el cual el régimen está en condiciones para la producción (Chávez Cadena y otros, 2020).

Entretanto, el criterio de mantenibilidad puede describirse como el nivel de expectativa esperado respecto de un sistema o maquinaria, el cual pueda ser ubicado en condiciones operativas en el margen de un tiempo estipulado, cuando las acciones de mantenimiento son desarrolladas en concordancia con las pautas preestablecidas (Reyes y otros, 2021).

2.1.32 Disponibilidad

El término disponibilidad es correspondiente a una maquinaria y la evaluación de rendimiento aplicada a ésta, que está basada en el cumplimiento de funciones precisas en

momentos precisos y en un espacio de tiempo preciso, tomando como base los juicios de mantenibilidad, confiabilidad y soporte para ejecutar el mantenimiento respectivo. Calcular la disponibilidad de los equipos industriales es vital para la selección y ejecución de tareas coherentes con las condiciones particulares de cada equipo o maquinaria (Cárcel, 2016).

Costta & Guevara (2015) aseveran que la disponibilidad consiste en que “el objetivo fundamental del mantenimiento es la capacidad de las máquinas o componentes para llevar a cabo su función requerida en un plazo predefinido” (pág. 39). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)}$$

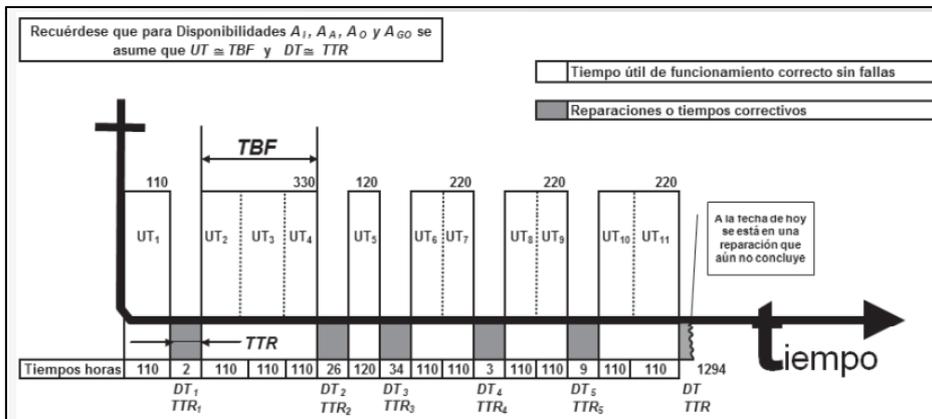
2.1.33 Indicadores de disponibilidad (MTBF y MTTR)

El indicador MTBF (Mean Time Between Failures) por sus siglas en inglés, corresponde al tiempo intermedio entre averías, y es uno de los indicadores puntuales para calcular la disponibilidad de equipos o maquinarias. En particular, este indicador comprende el promedio de tiempo transcurrido entre dos fallas en un mismo equipo. En la medida en que el MTBF sea más elevado, más confiable es la operatividad de la máquina en sí (Mora, 2009) .

El MTTR, también conocido como Tiempo Medio de Reparación, es un indicador significativo de la eficiencia del proceso de reparación llevado a cabo. Sirve para calcular la simpleza con la cual un equipo puede ser reparado. Un Tiempo Medio de Reparación prominente puede significar que el reemplazo de la máquina puede ser una mejor inversión que la reparación como tal (Mora, 2009).

Figura 47

MTBF y MTTR, Disponibilidad



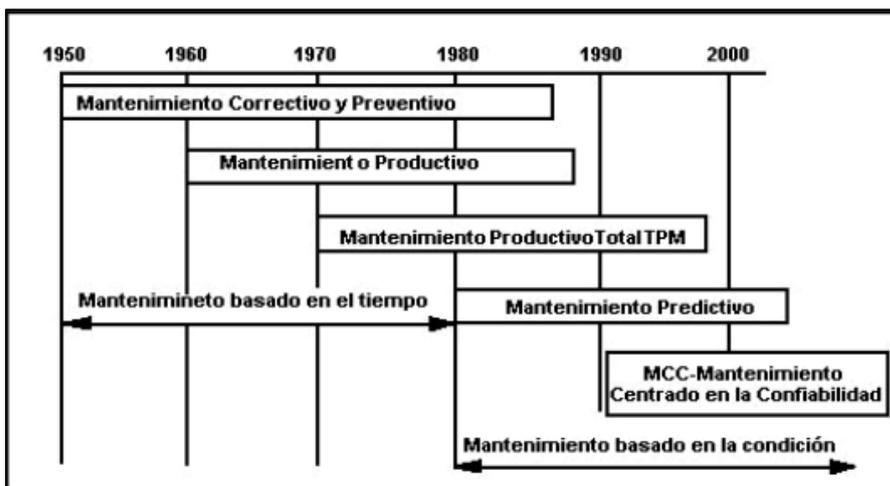
Nota. Fuente: Mora (2009, pág. 81)

2.1.34 Confiabilidad

La confiabilidad puede ser entendida como la "credibilidad" de que un dispositivo o sistema cumplirá su ocupación principal durante una etapa de tiempo establecido, bajo condiciones operativas normales (figura 48). Otro enunciado relevante de confiabilidad es la "posibilidad de que un dispositivo sea capaz de realizar su función designada a lo largo de un intervalo temporal definido y bajo circunstancias de uso específicas" (Mesa y otros, 2006).

Figura 48

Tipos de mantenimiento en el tiempo



Nota. Fuente: (Mora, 2009)

2.1.35 Mantenimiento y RCM

Desde la perspectiva de la ingeniería, dos componentes son esenciales para la gestión de cualquier objeto físico. Por un lado, es fundamental mantenerlo, y por otro, realizar modificaciones periódicas. No obstante, nuestra atención se centra en el mantenimiento. Al referirnos a la acción de mantener algo, buscamos que perdure en un estado particular. Deseamos preservar el estado actual en el que se encuentra, con la intención de que siga cumpliendo una o varias funciones específicas. Así, entonces en la figura 49 se evidencia que cuando se lleva a cabo tareas de mantenimiento en un objeto, nuestro propósito es mantener un estado en el cual dicho objeto continúe cumpliendo las funciones deseadas para el usuario (Moubray, 2004).

Figura 49

Ejemplo del RCM

REDUCTOR DE VELOCIDAD											
FUNCIÓNES	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	CAUSAS	OCURRENCIA	DETECCIÓN	EFECTOS DE FALLA	CONSECUENCIA	SEVERIDAD	RPN	TAREAS DE MANTENIMIENTO	
Reducir la velocidad de 1800 rpm a 60 rpm	No reduce a 60 rpm	Rodamiento desgastado(s)	Fatiga	5	4	Rodamiento vibra, se desgasta, suena, se recalienta y su movimiento se hace más difícil hasta llegar a un punto en la que no se puede mover más. Tiempo de diagnóstico y cambio: 12 horas.	Operacional	9	180	Monitoreo de vibraciones (máximo 4mm/s) Análisis de aceite (cantidad de partículas de desgaste y contaminantes)	
		Engranajes desgastados				Engranajes comienzan a desprender partículas, incrementándose cada vez más el daño, generando ruido intenso y su movimiento se hace más difícil hasta llegar a un punto en la que no se puede mover más. Tiempo de diagnóstico y cambio: 12 horas.				Monitoreo de vibraciones (máximo 4mm/s) Análisis de aceite (cantidad de partículas de desgaste y contaminantes)	
		Engranajes sueltos					Operacional				Videoscopia.
		Lubricante contaminado	Ingreso de contaminantes externos			Impide la generación de una adecuada capa lubricante en los engranajes y rodamientos, generando desgaste, sobreesfuerzos, recalentamientos y su movimiento se hace más difícil hasta llegar a un punto en la que no se puede mover más. Tiempo de diagnóstico y cambio: 12 horas.	Operacional				Análisis de aceite (salud y contaminantes)
		Lubricante deteriorado									Análisis de aceite (salud y contaminantes)

Nota. Fuente: Tomado de (RCM, Gestión del mantenimiento).

2.1.36 Mantenimiento Centrado en la garantía de funcionamiento

Es un procedimiento empleado para establecer las acciones necesarias con el fin de garantizar que cualquier objeto material continúe operando conforme a las expectativas de sus usuarios dentro del contexto operativo actual (Moubray, 2004).

2.1.37 Mantenimiento Productivo Total (TPM)

El TPM representa una perspectiva de gestión innovadora para el mantenimiento industrial. Este enfoque busca establecer estrategias que fomenten una mejora constante en las capacidades y procesos existentes, garantizando la disponibilidad constante de los

equipos de producción. En la figura 50 se muestra el diagrama del TPM, se centra en el mantenimiento y funcionamiento de los equipos con el objetivo de reducir las fallas y defectos traducidos en accidentes y producción, puede ser implementado por todos los empleados, mediante actividades realizadas en pequeños grupos, que abarcan la totalidad de la organización empresarial (García, 1998).

Figura 50
Pilares del TPM



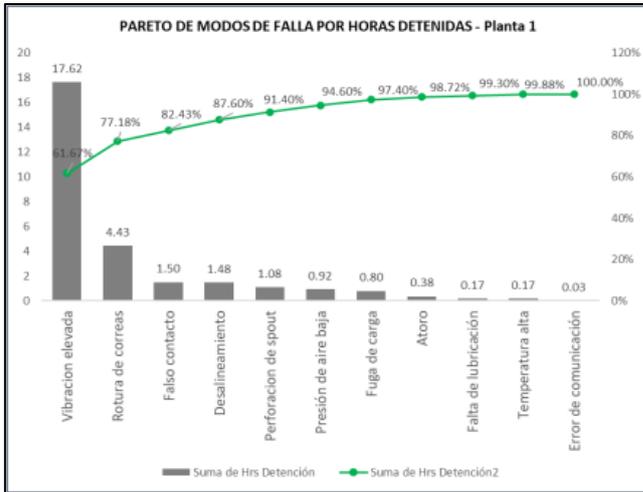
Nota. Fuente: Tomado de (RCM, Gestión del mantenimiento).

2.1.38 Diagrama de Pareto

Es una representación esquemática en la que se constituyen distintas categorías de data en un orden inverso, presentando barras individuales de derecha a izquierda. Estas clasificaciones se generan después de compilar los datos y asignarles una calificación de acuerdo a las causas. La finalidad es determinar un rango de prioridades mediante un análisis exhaustivo de los datos. Esta herramienta es ampliamente empleada, y resulta útil para identificar la causa primordial en el proceso de resolución de problemas, permitiendo establecer un orden de prioridades como se muestra en la figura 51 (Sales, 2013).

Figura 51

Diagrama de Pareto

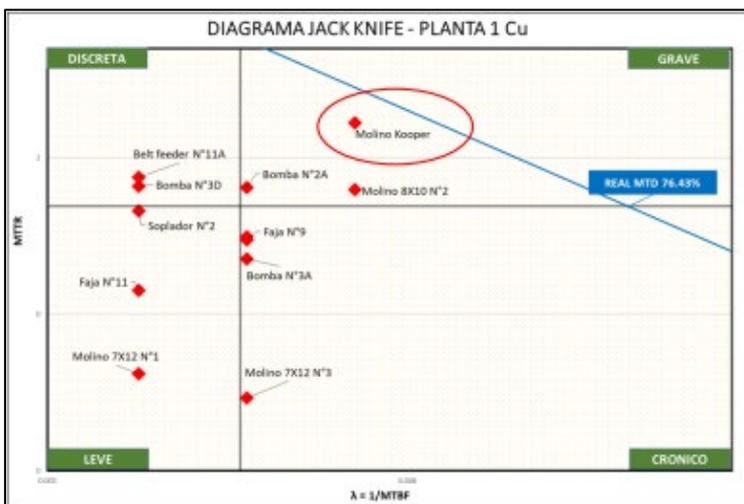


2.1.39 Diagrama Jack Knife

Es un enfoque de dispersión basado en múltiples criterios que ilustra diversas modalidades de fallos, componentes de equipos, equipos de un proceso, etc., en un diagrama que establece una relación entre la frecuencia de fallos, tal como se muestra en la figura 52 (expresada como la tasa de fallos " λ ") y algún otro indicador de sus implicaciones. Entre estos indicadores se incluyen el tiempo promedio de reparación (MTTR) y el tiempo promedio entre fallos (MTBF), por mencionar algunos (Esplugues de Llobregat, 1970).

Figura 52

Diagrama de Jack Knife



2.2 Marco Conceptual

Variable Independiente:

a) Sistema de sensado y monitoreo online

Son dispositivos que sirven para detectar y enviar cualquier forma de señal, tanto señales ambientales como humedad, temperatura y presión, como señales de estado los cuales recolectan los datos requeridos con el fin de mantener un monitoreo constante de diversas variables, que son esenciales para la seguridad, la gestión del riesgo, y también contribuyen a la productividad y la disminución de gastos.

b) Análisis Vibracional

El análisis vibracional se refiere fundamentalmente a la evaluación de los niveles y frecuencias de vibración en maquinaria industrial. Su objetivo principal es supervisar la condición de las máquinas y sus partes, con el fin de anticipar y evitar posibles fallos en las máquinas en movimiento.

Variable Dependiente:

c) Disponibilidad

Es la posibilidad de que un equipo este operando satisfactoriamente. Está basado en los tiempos de operación, tiempos de reparación y la cantidad de fallas que se presenta. Se expresa como la proporción de tiempo en que el sistema está presto para trabajar.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1 HIPÓTESIS

La implementación del sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional mejora significativamente la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

3.1.1 Matriz de operacionalización

Tabla 1

Matriz de operacionalización de las variables

"Implementación de un sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional para mejorar la disponibilidad del molino de bolas koppers 16.5 x 23 en una compañía minera"					
Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Variable Independiente: Sistema de monitoreo y sensado con análisis vibracional	La técnica de análisis de vibraciones forma parte del campo de mantenimiento predictivo y se utiliza para evaluar el estado de un componente rotativo mediante la recopilación de datos de vibración y un análisis de las señales, y frecuencias y niveles de vibración, lo que permite diagnosticar su estado mecánico (Guzman Restrepo, 2023).	El sistema de monitoreo online hace uso de la técnica de análisis de vibraciones, se requiere de un procedimiento basado en planes de mantenimiento predictivo, tales como la Planificación donde se revisa y se formula los objetivos, La Implementación , donde se lleva a cabo la propuesta y Evaluación donde se presenta los resultados y observamos que efectos tuvieron con nuestras dimensiones e indicadores. (Guzman Restrepo, 2023).	Planificación	Revisión del informe de diagnóstico del molino de bolas koppers 16.5 x 23. Análisis de criticidad de los equipos, AMEF del molino Kooper Formulación del plan de ejecución del sistema de monitoreo y sensado.	Razón
			Implementación	Proceso de implementación del sistema de monitoreo y sensado	Razón
			Evaluación	Evaluar las redes de comunicación Describir las tendencias generales Propuesta económica	Razón
Variable Dependiente: Disponibilidad	La disponibilidad se refiere a la posibilidad de que el equipo opere de manera efectiva cuando se necesita después de haber comenzado a funcionar, siempre que se utilice en condiciones estables. (Mora, 2009)	La disponibilidad se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación (MTBF), el tiempo activo de reparación (MTTR) (Mora, 2009).	Disponibilidad	$D = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)}$	Razón
			MTBF	$MTBF = \frac{\text{Tiempo promedio entre fallas}}{\text{numero de fallas}}$	Razón
			MTTR	$MTTR = \frac{\text{Tiempo promedio para reparar}}{\text{numero de fallas}}$	Razón

Nota. Adaptada al formato de la matriz operacional de la UNI. *Fuente:* *Elaboración propia.*

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1.1 Enfoque

Según los autores Hernández y Mendoza (2018), ellos indican que cuando el estudio se fundamenta en el enfoque cuantitativo, los datos recolectados son sometidos a procesamiento y análisis con el objetivo de obtener los resultados requeridos para su interpretación. Se examinan datos relacionados con las variables que posibilitaron la toma de decisiones mediante el uso de medidas cuantificables.

4.1.2 Tipo

El tipo de estudio es aplicado. Según Ñaupás et al. (2014), relatan que el estudio es de tipo aplicado, porque de esta manera se pueda solucionar imparcialmente las dificultades de los procesos de la disponibilidad de la industrial minera. Se elaborará la ejecución del sistema de censado y monitoreo online con la finalidad de analizar y lograr la solución al problema de la investigación, que son las vibraciones del molino de bolas Koppers de una compañía minera. Se plantean problemas y se elaboran hipótesis de trabajo con el fin de abordar los desafíos en los procesos de producción y mejorar los indicadores de tiempo durante la investigación.

4.1.3 Diseño

El diseño es pre experimental. Según Hernández y Mendoza (2018), explican que en el tipo de diseño planteado se deben realizar mediciones de la variable antes y después de la implementación del experimento. En este estudio se ejecutará el análisis del contexto presente de la disponibilidad del molino 20X30; luego se implementará el sistema de monitoreo y sensado con análisis vibracional, y luego se medirá nuevamente la disponibilidad, lo que corresponde al pretest y postest, a fin de evaluar los efectos del experimento. El gráfico del diseño se representa del siguiente modo:

GE: O1 ----- X ----- O2

Donde:

G.E. = Grupo experimental (molino de bolas koppers 16.5 x 23).

X = variable independiente (Sistema de monitoreo y sensado con análisis vibracional).

O1 = pretest

O2 = posttest

4.2 UNIDAD DE ANÁLISIS

Para la investigación se considerará como unidad de análisis a las frecuencias de operaciones diarias del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 de la compañía minera de Cerro de Pasco. La muestra que se evaluará para la respectiva contrastación de la hipótesis corresponderá a los meses de mayo – diciembre del 2021 y abril – noviembre del 2022, cuyo registro de procesos se evidenciará en los instrumentos de recolección de datos elegidos para la tesis.

4.3 POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

4.3.1 La Población

Está constituida por el molino de bolas Koppers, que se encuentra en una compañía minera donde se implementara el sistema de sensado y monitoreo online para poder aumentar la disponibilidad del molino, y se encuentren en buen estado.

4.3.2 La muestra

Será la misma cantidad pequeña que se encuentra establecida por la población, en el cual se efectuará el sistema de sensado y monitoreo online. La muestra estará representada por el molino de bolas Koppers de la compañía minera donde se está realizando la implementación.

4.4 TÉCNICA E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Técnica

Para la ejecución del presente trabajo de investigación se manejó la técnica análisis documental, la cual fue mediante el registro de información de los historiales de fallos y reparos del molino de bolas a través del sensado y monitoreo online de los sensores instalados en el molino de bolas Koppers.

Instrumentos

Se utilizó las fichas de obtención de datos que documentan las actividades de la maquina en la compañía minera. Estos datos son sobre la disponibilidad, tiempo de fallas y el tiempo de reparación, del antes y después de la propuesta del molino de bolas Koppers 16.5 x 23. Un instrumento se considera confiable cuando los resultados que proporciona son consistentes y aplicables en diferentes situaciones. En este informe de investigación los datos obtenidos se consideran confiables, ya que fueron proporcionados por la misma empresa.

4.5 TÉCNICA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Se emplea el software Excel para registrar los datos recopilados en la hoja de registro y para crear tablas y gráficos. Esto se realiza con el propósito de evaluar la ejecución de un sistema de monitoreo en línea del molino de bolas Koppers y para verificar si los datos numéricos relacionados con la disponibilidad, así como los tiempos de falla y reparación, se alinean con los efectos derivados en las pruebas.

4.6 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

Las etapas que se contemplarán en el desarrollo de la tesis se considerarán tres: planificación, implementación y evaluación.

La planificación

En ella se partirá del diagnóstico (pretest) de la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23, ya que existe un informe sobre tal variable en atención al MTBF y al MTTR. Cabe señalar que el diagnóstico se realizará mediante varias herramientas: el diagrama de Ishikawa, el diagrama de Pareto a través de la verificación de causas raíz del problema detectado, además de los indicadores de disponibilidad de la maquinaria: MTBF y MTTR. Con tal información, se procederá a evaluar el sistema de monitoreo y sensado con análisis vibracional pertinente, que favorezca en el perfeccionamiento de la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 de la empresa minera.

La implementación

Se desarrollará el sistema de monitoreo online y sensado con análisis vibracional, teniendo en cuenta los 39 requerimientos técnicos y la adecuación a los diferentes sistemas del molino de bolas Koppers 16.5 x 23. Por consiguiente, se valorará lo propuesto en la etapa de planificación.

La evaluación

Se evaluará la disponibilidad en cuanto a su nivel de operatividad y los indicadores MTBF Y MTTR (postest), a fin de advertir la influencia o los posibles cambios generados en la disponibilidad del molino de bolas koppers 16.5 x 23.

4.7 MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS

Recaen en el procesado de datos mediante software como Excel 2019, donde se usa como fuente de recolección de la información de cada objetivo que se está trabajando, posteriormente se trabaja con el programa SPSS V.26, el cual nos ayuda a analizar los datos ya recolectados para inferir su distribución y cómo se representa en el estudio, según la información por parte de nuestra muestra y porcentajes para plasmar los resultados.

4.8 ASPECTOS ÉTICOS

En este estudio se velará por la transparencia de toda la indagación y la aptitud de los datos recolectados sobre el proyecto, para de esta forma no tergiversar el conocimiento. Asimismo, se trabaja de una forma en la que no se adultere la información y se siga los procedimientos establecidos por el código de ética del investigador de la UNI. Se somete por el aporte a la investigación y la integridad de la ciencia.

CAPITULO V

DESARROLLO DE LA TESIS

5.1 PLANIFICACIÓN

Para realizar la ejecución del sistema de sensado y control online apoyado en el análisis vibracional se necesita planificar las actividades que se realizará para las tareas en cada procedimiento. Como primer paso se realizó la observación directa del molino de bolas Kooper 16.5x23; se diagnosticó la situación actual del molino y los puntos donde será implementado el sistema bajo el modo de fallas de vibración elevada en los puntos críticos del molino donde se presentan eventos perjudiciales para la planta para después desarrollar la implementación y finalmente la propuesta económica del sistema.

Objetivos:

a) Revisión del Informe de diagnóstico del molino

- Diagrama de flujo de la Planta 1 (Figura 53).
- Análisis de criticidad, mantenibilidad y número de fallas de los equipos.
- Análisis del modo y efecto de fallas (AMEF) del molino Kooper

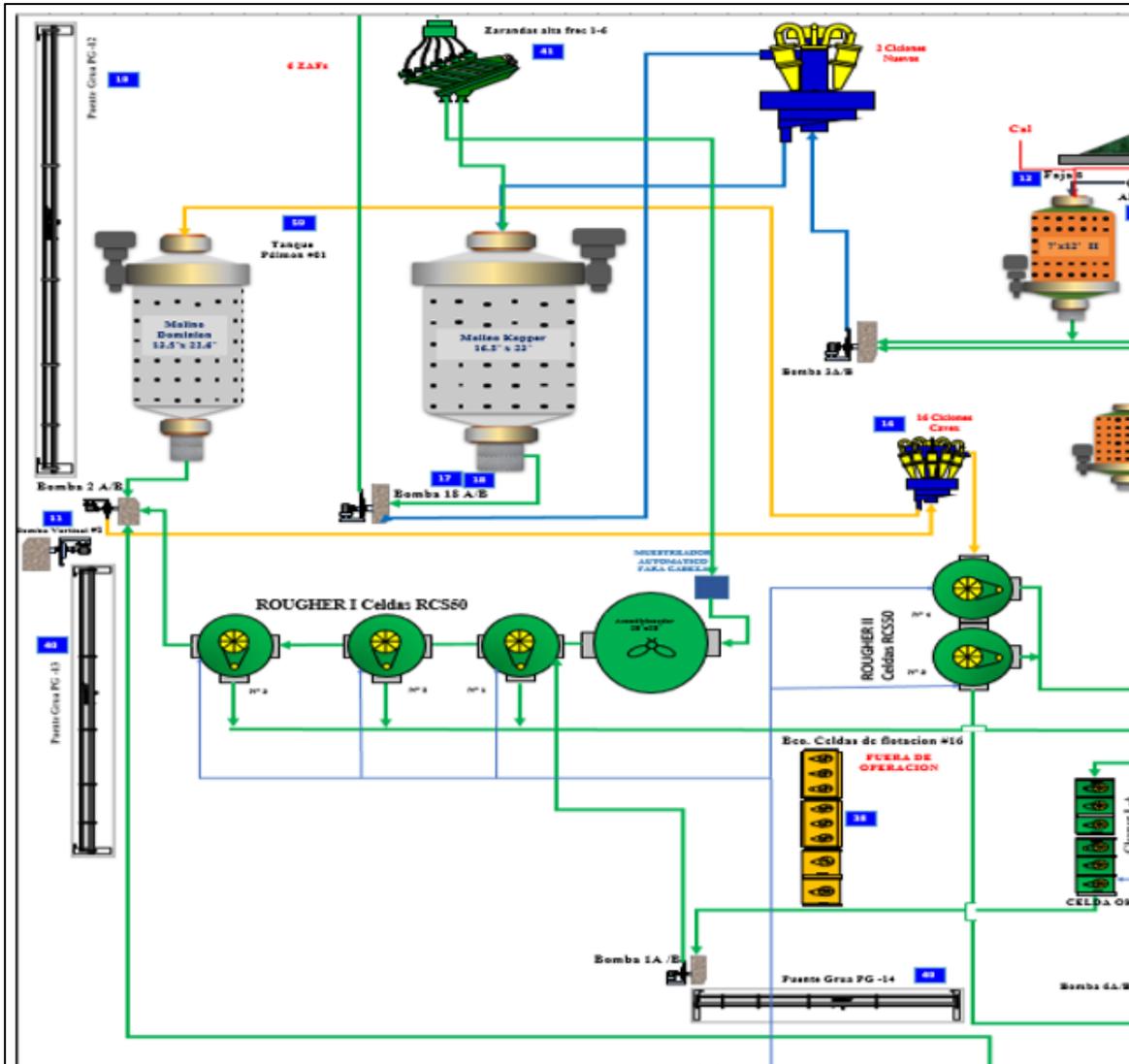
b) Formulación del Sistema de Sensado

- Diagrama de Gantt.
- Puntos de implementación.
- Procedimiento de la Implementación.

c) Propuesta económica de la Implementación

Figura 53

Diagrama de flujo – de la planta 1



Nota. Fuente: Planta 1. Unidad Minera.

5.1.1 Matriz de Criticidad de la Planta 1

Para el estudio de la criticidad de los equipos en la Planta 1 se utilizó los criterios de evaluación y establecer la jerarquización de criticidad como se muestra en la tabla 2, con los rangos de criticidad y una breve descripción del nivel.

Tabla 2

Rango de criticidad

Rango	Criticidad	Descripción
[25- 40 >	4	Alta Criticidad
[20 – 25 >	3	Mediana Criticidad
[15 – 20>	2	Baja Criticidad
[10 – 15>	1	Muy Baja Criticidad

Tabla 3

Análisis de criticidad de los equipos – Planta 1

CRITERIO DE EVALUACION	CLASIFICACION	PTJ	RIESGO
Frecuencia de Falla	· Más de 48 fallas por año	20	Alto
	· Entre 24 y 36 fallas por año	15	Medio
	· Entre 12 y 24 fallas por año	10	Bajo
	· Máxima 12 fallas por año	5	Muy bajo
Impacto en la Producción	· Reduce entre [60% - 100%] de producción en el sistema.	20	Alto
	· Reduce entre [30% - 60%] de producción en el sistema	15	Medio
	· Reduce entre [10% - 30%] de producción en el sistema.	10	Bajo
	· Reduce entre [0% - 10%] de producción en el sistema	5	Muy bajo
Tiempo Promedio para Reparar	· Más de 12 horas	20	Alto
	· Entre 06 y 12 horas	15	Medio
	· Entre 02 y 06 horas	10	Bajo
	· Menos de 02 horas	5	Muy bajo
Costo de Reparación	• Más de \$ 20,000.00	20	Alto
	• Entre \$ 10,000.00 y \$ 20,000.00	15	Medio
	• Entre \$ 2,000.00 y 10,000.00	10	Bajo
	• Menos de \$ 2,000.00	5	Muy bajo
Impacto en la Seguridad	· Muerte - Pérdida total del equipo	20	Alto
	· Incapacidad permanente - Reparación mayor	15	Medio
	· Incapacidad temporal - Reparación menor	10	Bajo
	· Lesión leve - No amerita reparación	5	Muy bajo
Impacto en el Medio Ambiente	· Irreversible	20	Alto
	· Grave	15	Medio
	· Moderado	10	Bajo
	· Ninguno	5	Muy bajo

Nota. Fuente: tomados de los indicadores de mantenimiento de la Planta 1, Unidad Minera.

$$Crucidad: FF + \sum ((IP \times P_{IP}) + (MTTR \times P_{MTTR}) + (CR \times P_{CR}) + (IS \times P_{IS}) + (IMA \times P_{IMA}))$$

Donde:

FF: Frecuencia de Falla

P_{IP} : Peso de IP = 0.20

IP: Impacto en la Producción

P_{MTTR} : Peso de MTTR = 0.15

MMTR: Tiempo promedio para reparar

P_{CR} : Peso de CR = 0.15

CR: Costo de Reparación

P_{IS} : Peso de IS = 0.25

IS: Impacto en la Seguridad

IMA: Impacto en el Medio Ambiente = 0.25.

De acuerdo a la jerarquización se desarrolló la evaluación de criticidad de los equipos (Figura 54). Se puede evidenciar que el molino Kooper 16.5 x 23 es uno de los equipos más críticos con que cuenta la planta.

Figura 54

Criticidad de equipos de la Planta 1

EVALUACIÓN DE CRITICIDAD DE ACTIVOS (Equipos Rotativos) - SMEB			
Circuito	Descripción del Activo	Puntaje de Evaluación	C = Criticidad del Activo
FLOTACION COBRE	CELDA DE FLOTACION METSO RCS 70 *P1 Scavenger II Bulk N° 2 - PB FINO	20	3
MOLIENDA PRIMARIA	FAJA TRANSPORTADORA N° 10 24" X 123' *P1	20.75	3
MOLIENDA PRIMARIA	FAJA TRANSPORTADORA N° 11 24" X 125' *P1	20.75	3
MOLIENDA PRIMARIA	FAJA TRANSPORTADORA N° 8 24" X 134' *P1	20.75	3
MOLIENDA PRIMARIA	FAJA TRANSPORTADORA N° 9 24" X 125' *P1	20.75	3
MOLIENDA PRIMARIA	MOLINO DE BARRAS 7' X 12' N° 1 COMESA *P1 MOL PRIM	29.5	4
MOLIENDA PRIMARIA	MOLINO DE BARRAS 7' X 12' N° 2 *P1 MOL PRIM	29.5	4
MOLIENDA PRIMARIA	MOLINO DE BARRAS 7' X 12' N° 3 COMESA *P1 MOL PRIM	29.5	4
MOLIENDA PRIMARIA	MOLINO DE BARRAS 7' X 12' N° 4 COMESA *P1 MOL PRIM	29.5	4
MOLIENDA SECUNDARIA	MOLINO DE BOLAS 16.5' X 23' KOPPERS *P1 MOL SECUNDARIA	32.25	4
MOLIENDA TERCARIA	MOLINO DE BOLAS 13.5' X 22' 8" DOMINION *P1 MOL TERCARIA	27.25	4
REMOLIENDA	MOLINO DE BOLAS 8' x 10' N° 3 COMESA *P1 REMOL ZN/CU	22.25	3
MOLIENDA PRIMARIA	MOLINO DE BOLAS 20' X 30' *P2	34.25	4
MOLIENDA SECUNDARIA	BOMBA CENTRIFUGA HORIZONTAL N° 2 A 14X12 STAH R55/A05 *P2 BP2A	20	3
MOLIENDA SECUNDARIA	BOMBA CENTRIFUGA HORIZONTAL N° 2 B 14X12 STAH R55/A05 *P2 BP2B	20	3
MOLIENDA SECUNDARIA	MOLINO DE BOLAS 16' X 22' OSBORN *P2	25	4
REMOLIENDA PLOMO	BOMBA HORIZONTAL 8X6	22	3
REMOLIENDA PLOMO	BOMBA HORIZONTAL WARMAN 8X6	22	3
REMOLIENDA PLOMO	MOLINO DE BOLAS 9.5' X 14' COMESA *P2 REMOL PB	30	4
REMOLIENDA ZINC	BOMBA HORIZONTAL 10X8	16	2
REMOLIENDA ZINC	BOMBA HORIZONTAL WARMAN 10X8	16	2
REMOLIENDA ZINC	MOLINO DE BOLAS 9.5' X 12' COMESA *P2 REMOL ZN	18.25	2
REMOLIENDA ZINC	MOLINO DE BOLAS 9.5' X 12' COMESA *P2 REMOL ZN	18.25	2
SISTEMA TRANSPORTE	FAJA TRANSPORTADORA N° C3 *P2	18.5	2
SISTEMA TRANSPORTE	FAJA TRANSPORTADORA N° C4 *P2	18.5	2
SISTEMA TRANSPORTE	FAJA TRANSPORTADORA N° C6 *P2	18.5	2
SISTEMA TRANSPORTE	FAJA TRANSPORTADORA N° C7 *P2 MOLIENDA SECUND.	23.5	3
SISTEMA TRANSPORTE	FAJA TRANSPORTADORA N° C9 *P2	23.5	3
R ESPESAMIENTO	ESPESADOR 40' Ø X 10' CU *ZESP (EX ALMAC. LAMAS HOLDING TANK)	20	3
R ESPESAMIENTO	ESPESADOR 40' Ø X 10' PB *ZESP	20	3
R ESPESAMIENTO	ESPESADOR 60' Ø X 10' CU *ZESP	20	3
R ESPESAMIENTO	ESPESADOR 80' CU Ø X 15' *ZESP	20	3
C FILTRADO	FILTRO PRENSA ANDRITZ 2000 X 2000 C/ 54 PLACAS N° 3 - FP3 *PF	34.25	4
C FILTRADO	FILTRO PRENSA NETZCH 2000 X 2000 C/ 21 PLACAS N° 1 FP1 *PF	33.5	4
C FILTRADO	FILTRO PRENSA NETZCH 2000 X 2000 C/ 23 PLACAS N° 2 FP2 *PF	33.5	4

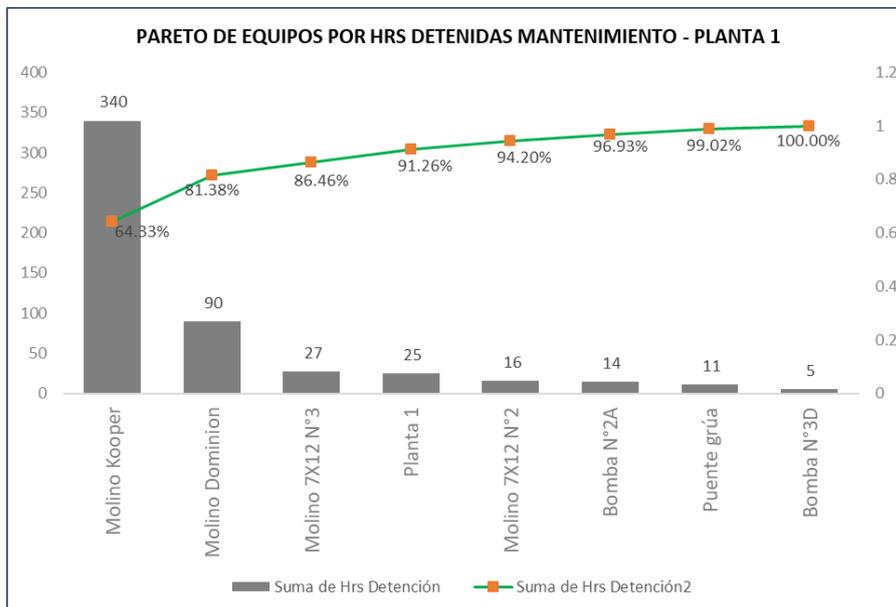
Nota. Fuente: tomado de la Planta 1- Unidad Minera.

En la Figura 55 se visualiza el diagrama de Pareto de los equipos por horas de detención dentro de la planta 1, donde se evidencia que el molino Kooper es el más indisponible, contando con 340 horas de paradas desde la semana 23 hasta la semana 53 del año 2021.

5.1.2 Análisis de mantenibilidad de los equipos

Figura 55

Diagrama de Pareto. Horas detenidas de los equipos Planta 1



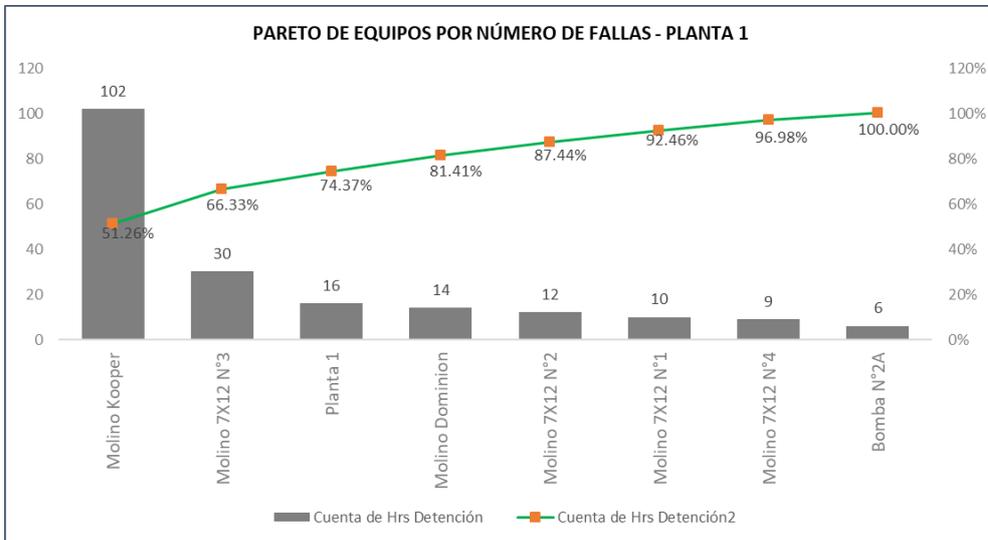
Nota. Fuente: Tomada del reporte – Planta 1

En la Figura 56, se visualiza el diagrama de Pareto de número de fallas de la planta 1, donde se puede evidenciar que el molino Kooper es el equipo más indisponible de la planta 1, teniendo 102 veces de detención desde la semana 23 hasta la semana 53 del 2021.

5.1.3 Análisis de número de fallas de los equipos

Figura 56

Diagrama de Pareto de equipos por número de fallas – Planta 1

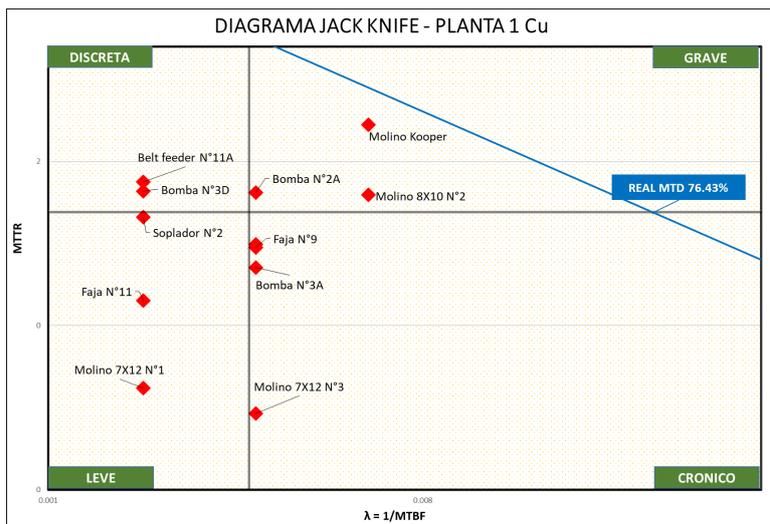


Nota. Fuente: Tomada del reporte – Planta 1

En el Diagrama de Jack Knife de la Figura 57 se puede apreciar un Dispatch de tasa de fallas y MTTR de los equipos de la Planta 1, y se observa que el molino Kooper es el más indisponible de la planta 1.

Figura 57

Diagrama de Jack Knife de equipos, Planta 1



Nota. Fuente: Tomada del reporte – Planta 1

5.1.4 Análisis de modo y efecto de fallas (AMEF) del molino

Tabla 4

AMEF del molino de bolas Kooper

Equipo	Sistema	Componente	Descripción	Falla funcional	Modo de fallo	Acciones correctivas
Molino de bolas Kooper	Sistema de Acoplamiento	Motor eléctrico	Realizar la transformación de energía eléctrica a energía mecánica	No transmite par de torque Transmite giro menor a las RPM nominal.	Eje roto	Inspección rutinaria del componente
					Eje trabado	Verificación del montaje
					Exceso de vibración	Monitoreo del componente
				Temperatura en estator y/o rodamientos supera 70°C	Sobrecalentamiento	Verificación de funcionamiento de calentador
		Reductor	Proporcionar velocidad de giro y torque (T)	No transmite par de torque No transmite giro Transmite torque menor al torque nominal	Eje y engranaje trabado	Verificación del montaje del componente
					Eje y engranaje roto	Inspección rutinaria del componente
					Acople roto	Verificación de ajuste de componente
					Exceso de vibración	Monitoreo de componente
				Temperatura en reductor supera 80 °C	Sobrecalentamiento	Mantenimiento rutinario de componente

		Freno	Bloquea el giro del motor	No bloquea el giro del molino	Disco Roto	Monitoreo del componente
	Sistema de avance lento	Motor eléctrico	Realizar la transformación de energía eléctrica a energía mecánica	No transmite par de torque No transmite giro Transmite giro menor a las RPM nominal	Eje / engranaje roto	Inspección rutinaria del componente
Eje / engranaje trabado					Lubricación de acuerdo al programa de mantenimiento	
Acople roto					Verificación del montaje de acoplamiento	
Exceso de vibración					Monitoreo del componente	
Temperatura en estator y/o rodamientos supera 70°C					Sobrecalentamiento	Mantenimiento rutinario de componente
Reductor		Proporcionar velocidad de giro y torque (T)	No transmite par de torque No transmite giro Transmite torque menor al torque nominal	Temperatura en reductor supera 80 °C	Eje y engranaje trabado	Verificación del montaje del componente
					Eje y engranaje roto	Inspección rutinaria del componente
					Acople roto	Verificación de ajuste de componente
					Exceso de vibración	Monitoreo de componente
					Sobrecalentamiento	Mantenimiento rutinario de componente

Sistema Estructural	Cuerpo del Molino	Llevar en su interior el proceso de molienda a la capacidad nominal	Presenta capacidad de molienda menor a la establecida	Revestimiento desgastado	Inspeccionar parámetros de operación
		Mantener fijado los revestimientos en el interior	Revestimientos desprendidos	Exceso de vibración y ruido	Monitorear el sistema de accionamiento
		Contener el mineral, bolas de acero y agua de proceso	No contiene material	Fuga de material	Verificar el ajuste del componente
	Corona	Transmitir el par de giro del piñón al cuerpo del molino a la velocidad de diseño establecido en RPM	No transmite par de giro al cuerpo del molino	Molino detenido	Inspeccionar y analizar vibraciones en componente
			Giro de molino a RPM menor a la nominal	Velocidad baja de molino	Verificación del montaje del componente
	Piñón	Transmitir el par de giro del reductor a la corona a la velocidad de diseño establecido en RPM	No transmite par de giro a la corona	Molino detenido	Inspeccionar y analizar las vibraciones del componente
			Giro del piñón a RPM menor a la nominal	Velocidad baja de molino	Verificación del montaje del componente
	Trunion	Guiar y clasificar la descarga de	No guía el mineral	Derrames	Inspección rutinaria de componente

		mineral producto del molino a la capacidad de diseño establecida en T/h.	No clasifica mineral	Obstrucción del mineral	Monitoreo adecuado del componente	
				Obstrucción de mineral	Monitoreo adecuado del componente	
				Derrames	Verificación de ajustes del componente	
		Tapas Laterales	Decepcionar la alimentación y realizar la descarga del producto de molienda	No contiene material	Revestimiento desgastado	Inspeccionar parámetros de operación
					Exceso de vibración y ruido	Monitorear el sistema de accionamiento
					Fuga de material	Verificar el ajuste del componente
	Sistema Lubricación del Motor	Motor eléctrico	Realizar la transformación de energía eléctrica a energía mecánica para ofrecer potencia 0.75 W, velocidad de giro 1730 RPM a una temperatura máxima de 70 °C.	No transmite par de Torque Transmite giro menor a las RPM nominal	Eje roto	Verificación de ajustes del componente
					Eje trabado	Inspeccionar y analizar las vibraciones del componente
					Exceso de vibración	Monitoreo vibracional del componente
					Temperatura en estator y/o rodamientos, supera 70°C	Sobrecalentamiento
	Bomba Hidráulica	Realizar la transformación de	No genera caudal requerido por el sistema	Fuga de aceite	Monitoreo del componente	

			energía mecánica a energía hidráulica para generar caudal (GPM) requerido por el sistema	No genera presión requerida por el sistema	Caída de presión	Inspeccionar filtros y eficiencia en el componente
Sistema Lubricación del Reductor	Motor eléctrico	Realizar la transformación de energía eléctrica a energía mecánica para ofrecer potencia 0.75 W, velocidad de giro 1775 RPM a una temperatura máxima de 70 °C.	No transmite par de Torque Transmite giro menor a las RPM nominal	Eje roto	Verificación de ajustes del componente	
				Eje trabado	Inspeccionar y analizar las vibraciones del componente	
				Exceso de vibración	Monitoreo vibracional del componente	
			Temperatura en estator y/o rodamientos, supera 70°C	Sobrecalentamiento	Lubricación de acuerdo al programa de mantenimiento	
	Bomba Hidráulica	Realizar la transformación de energía mecánica a energía hidráulica para generar caudal (GPM) requerido por el sistema, Cantidad de bombas: 6	No genera caudal requerido por el sistema	Fuga de aceite	Monitoreo del componente	
			No genera presión requerida por el sistema	Caída de presión	Inspeccionar filtros y eficiencia en el componente	

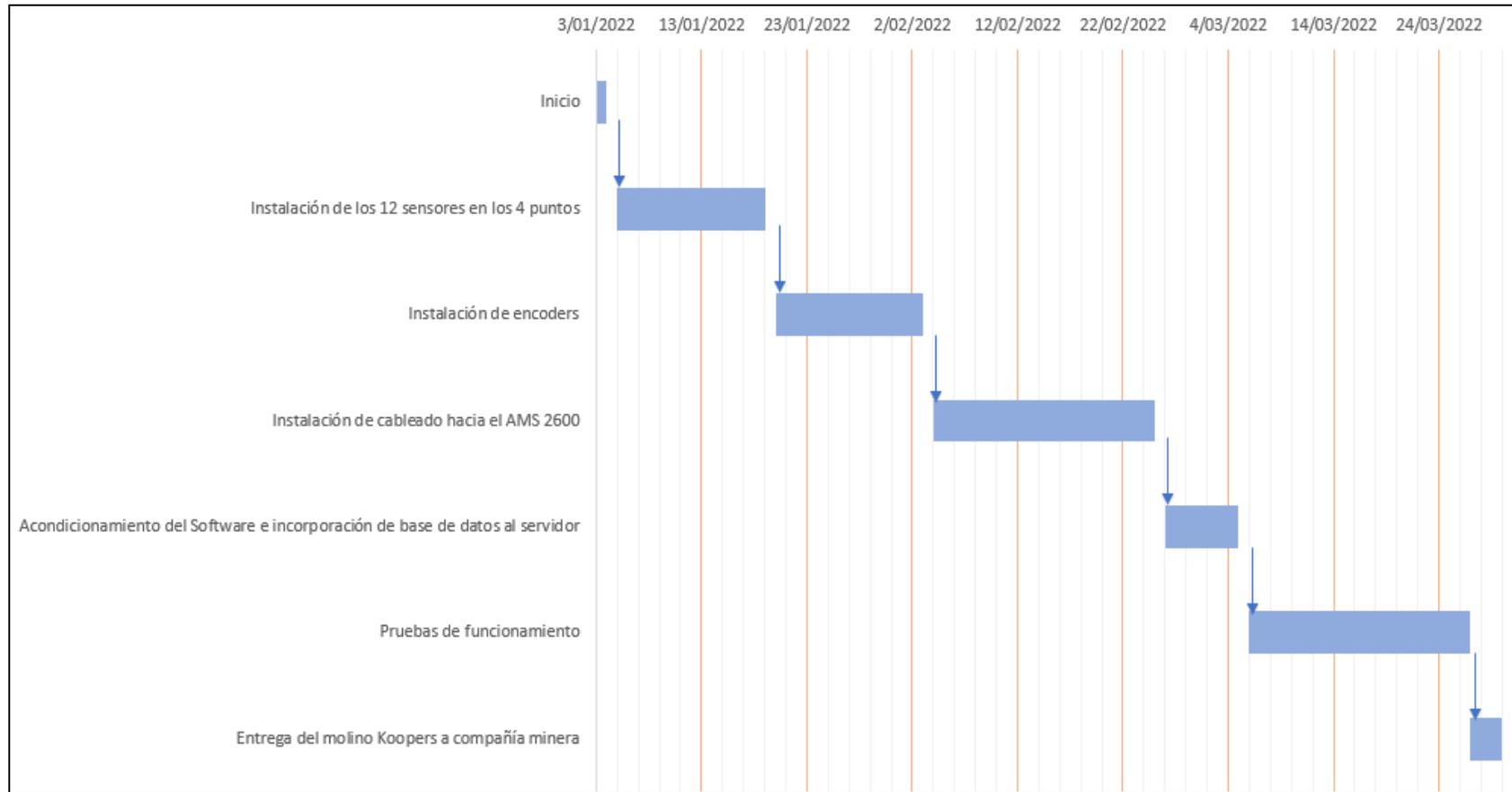
	Sistema de Circulación	Motor eléctrico	Realizar la transformación de energía eléctrica a energía mecánica para ofrecer potencia 0.75 W, velocidad de giro 1775 RPM a una temperatura máxima de 70 °C.	No transmite par de Torque Transmite giro menor a las RPM nominal	Eje roto	Verificación de ajustes del componente
					Eje trabado	Inspeccionar y analizar las vibraciones del componente
					Exceso de vibración	Monitoreo vibracional del componente
				Temperatura en estator y/o rodamientos, supera 70°C	Sobrecalentamiento	Lubricación de acuerdo al programa de mantenimiento
		Bomba Centrífuga	Realizar la transformación de energía mecánica a energía hidráulica para generar caudal de 103. 3 M3/ hr requerido por el sistema.	No genera caudal requerido por el sistema	Fuga de fluido	Monitoreo del componente
				No genera presión requerida por el sistema	Caída de presión	Realizar inspección y ajuste del componente

Nota. Elaboración propia

5.2 IMPLEMENTACIÓN

Figura 58

Diagrama de Gantt, Actividades para la implementación



Nota. Fuente: Tomada de la Planta 1 Unidad Minera

Procedimientos

Para la recolección de datos de vibraciones del equipo se utilizó el siguiente instrumento:

- Colector Online Emerson AMS 2600 de
- Analizador de Vibraciones Marca CSI 2140 de 04 Canales.

Figura 59

Analizador de Vibraciones

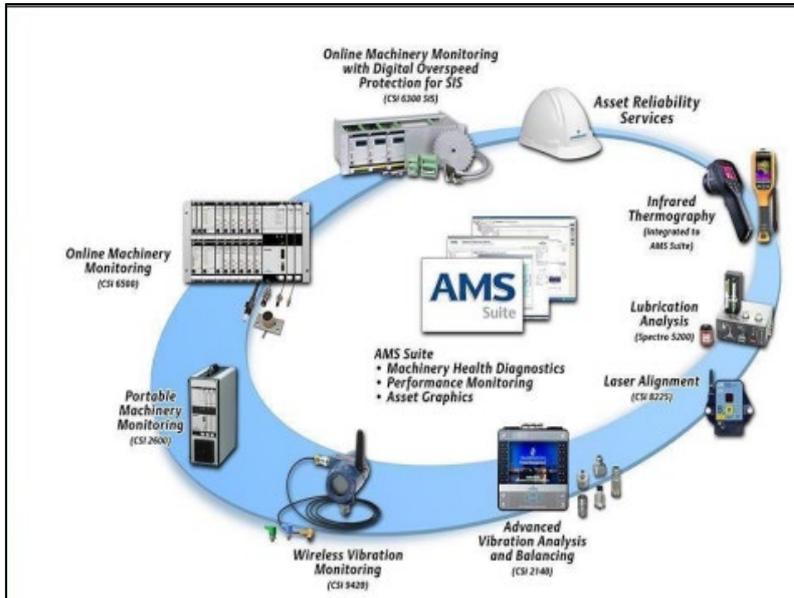


Nota, Fuente de (Emerson, 2016)

- A. Enchufe de la fuente de energía.
 - B. Puerto Ethernet.
 - C. Puerto Micro USB.
 - D. Indicador LED de red inalámbrica.
 - E. Indicador LED de Bluetooth®.
- Software de mantenimiento Predictivo Machinery Health Manager Version 5.61
Se establece un ciclo de mejoramiento continuo en donde el programa actual esté sujeto a revisiones, análisis y correcciones, y de ser necesario ampliaciones para implementar mejoras que luego sean medibles y revisadas en un proceso cíclico cerrado, tal como se muestra en la figura 60.

Figura 60

Ciclo de mejoramiento continuo



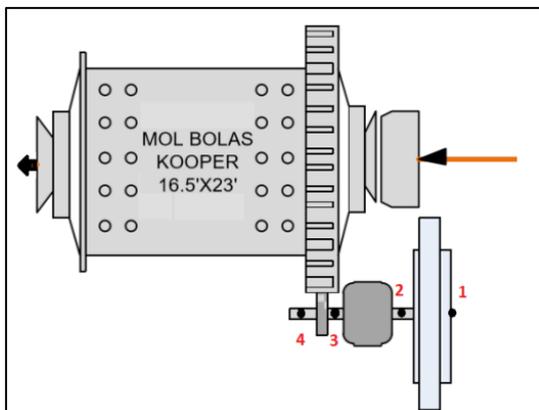
Nota. Fuente: Tomado de (Emerson, 2016).

Puntos de medición

Luego de indicar que el molino de bolas Kooper presenta una baja disponibilidad y está dentro de los equipos más críticos de la planta. Se procedió a evaluar los puntos como se muestra en la figura 61, donde se instalaron los sensores de análisis vibracional, teniendo en cuenta aquellos puntos, los cuales son más críticos que otros. Ello se basa en la experiencia del analista.

Figura 61

Molino Kooper 16.5x23 – puntos de medición



Configuración del AMS 2600

Después de instalar los sensores mono axiales en el AMS 2600 (Figura 62), el régimen de monitoreo en tiempo real implica registrar las señales provenientes de estos sensores de vibración en varios puntos del molino Kooper 16.5 x 23. Estos sensores tienen la capacidad de recopilar datos de oscilación y temperatura. En lo que respecta a la medición de vibración, pueden detectar datos de celeridad de oscilación en milímetros por segundo, circundante de aceleración, deslizamiento, entre otros. La unidad de monitoreo procesa esta indagación de forma instantánea y la transmite de manera inalámbrica al servidor de la conexión TCP/IP (dentro de la red intranet de CMDIC), y luego la descarga claramente en un servidor para su posterior análisis y visualización.

Figura 62

AMS 2600



Nota. Fuente: Tomado de PTSAC

ANÁLISIS AVANZADO

El monitoreo y análisis será realizado por un especialista certificado en la técnica de análisis vibracional. La empresa contratista será responsable de la creación y configuración de la base datos para esta técnica. Esto incluye: levantamiento de información y creación de fichas técnicas de los activos, asignación de niveles de criticidad, selección

de planos y puntos de cálculo, disposición de los lugares de cálculo, definición de frecuencia de monitoreo, configuración de valores de alarma establecidos, etc. De la misma forma, se revisará/mejorará los parámetros personalizados por cada equipo, tales como rodamientos, números de polos de motores eléctricos, número de álabes de impulsores de bombas, número de dientes por engranaje de reductores, etc.

La empresa contratista, según el alcance del requerimiento del equipo a utilizar para el servicio, es un AMS 2600, de alta tecnología ON LINE con capacidad de recolectar los datos de vibraciones en una ruta predeterminada que pase por toda la planta. Es la pieza clave de los programas de mantenimiento predictivo de la actualidad. Las mismas herramientas pueden ofrecer pruebas de análisis sofisticadas de los activos con problemas (figura 63). Una de las mayores ventajas es brindar monitorización las 24 horas del día, los 7 días de la semana. El AMS 2600 tiene la potencia para brindar respuestas cuantitativas.

Figura 63

CSI 2600 Machinery Health Expert (accessories)



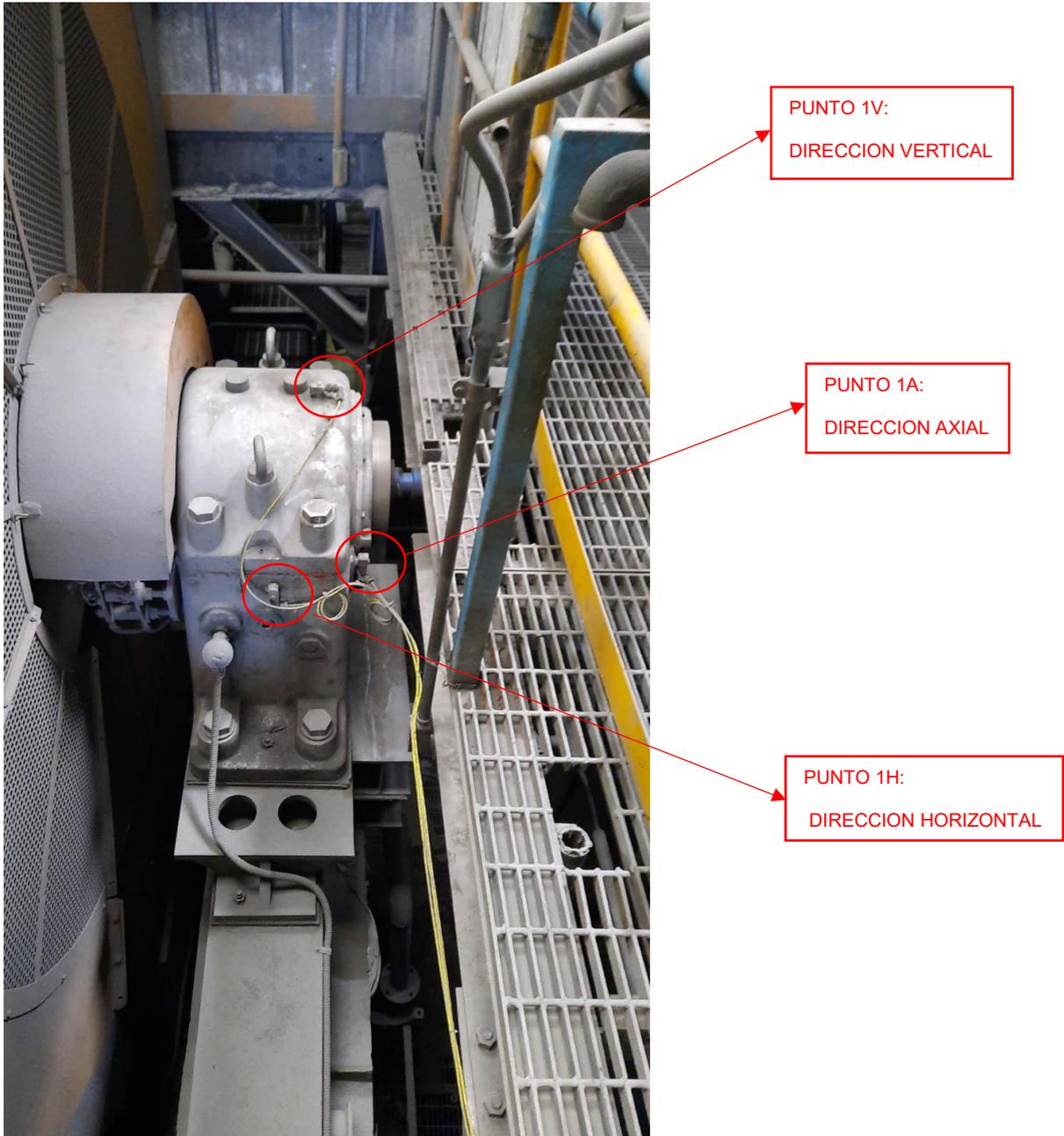
Nota. Fuente (Emerson, 2016)

PUNTO 1 : LADO LIBRE DEL MOTOR

Se instalaron los sensores monoaxiales en las orientaciones vertical, horizontal y axial en el punto 1, lado libre del motor del molino, tal como se muestra en la figura 64. A cada sensor se extiende cableado al módulo del AMS 2600, para luego codificar la señal.

Figura 64

Punto 1, lado libre del motor



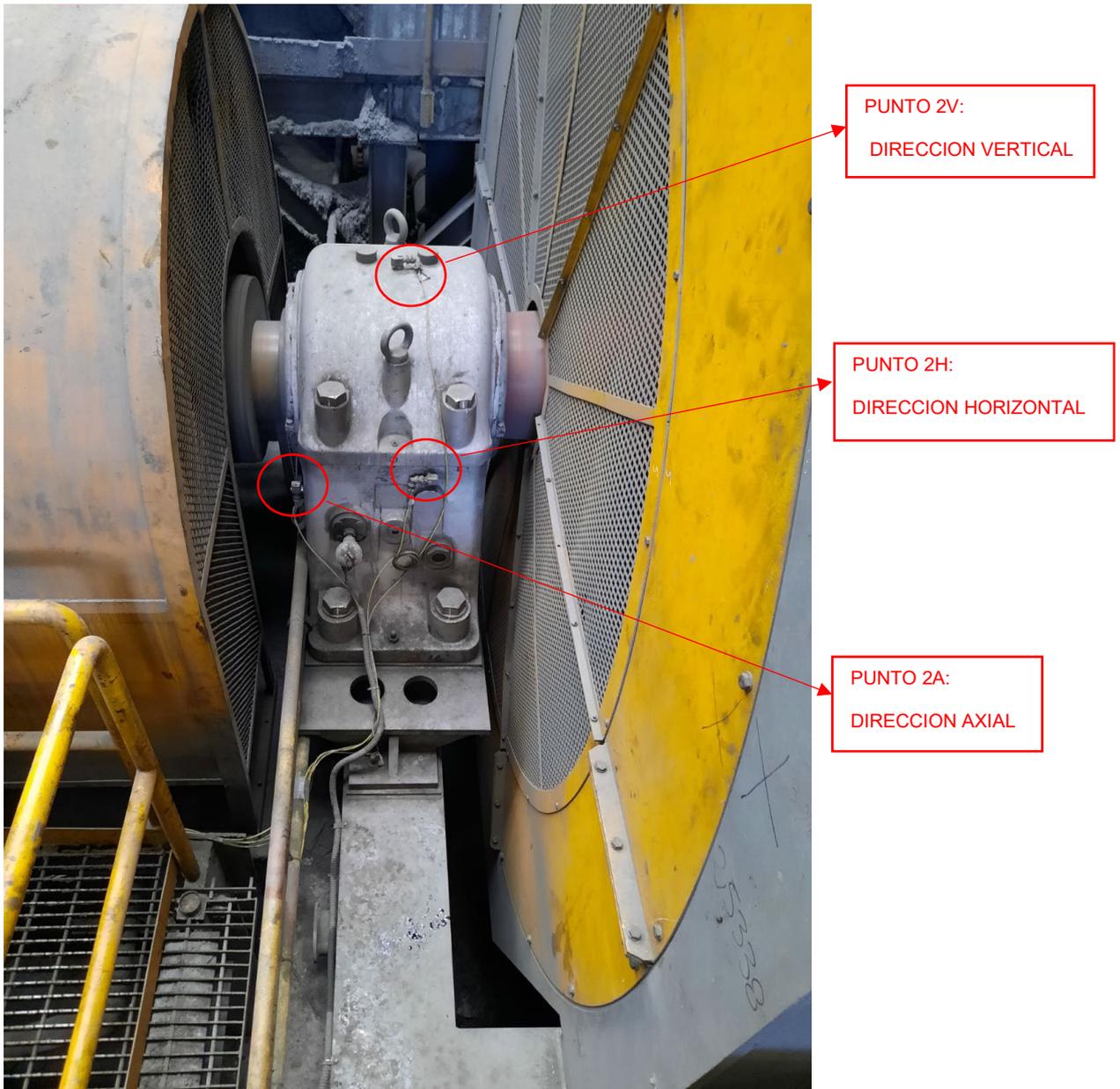
Nota. Elaboración propia.

PUNTO 2 : LADO ACOPLE DEL MOTOR

Se instaló los sensores monoaxiales en las orientaciones: vertical, horizontal y axial en el punto 2 lado acople del motor del molino tal como se muestra en la figura 65, a cada sensor se extiende cableado al módulo del AMS 2600 para luego codificar la señal.

Figura 65

Punto 2, Lado acople del motor



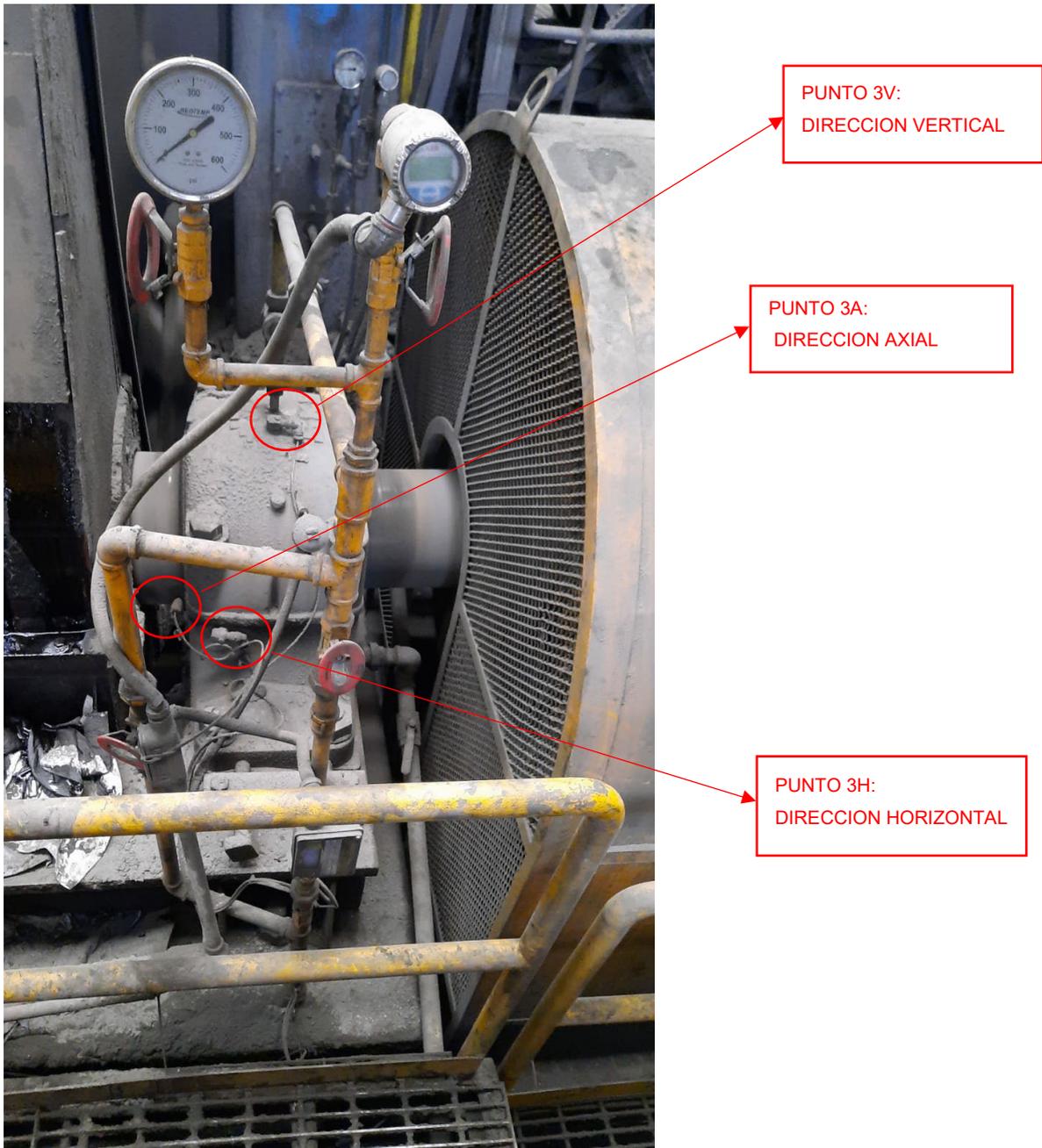
Nota. Elaboración propia

PUNTO 3 : LADO ACOPLE DEL PIÑÓN

Se instalaron los sensores monoaxiales en las orientaciones vertical, horizontal y axial en el punto 3, lado acople del piñon del molino, tal como se muestra en la figura 66. A cada sensor se extiende cableado al módulo del AMS 2600, para luego codificar la señal.

Figura 66

Punto 3, Lado acople del piñón



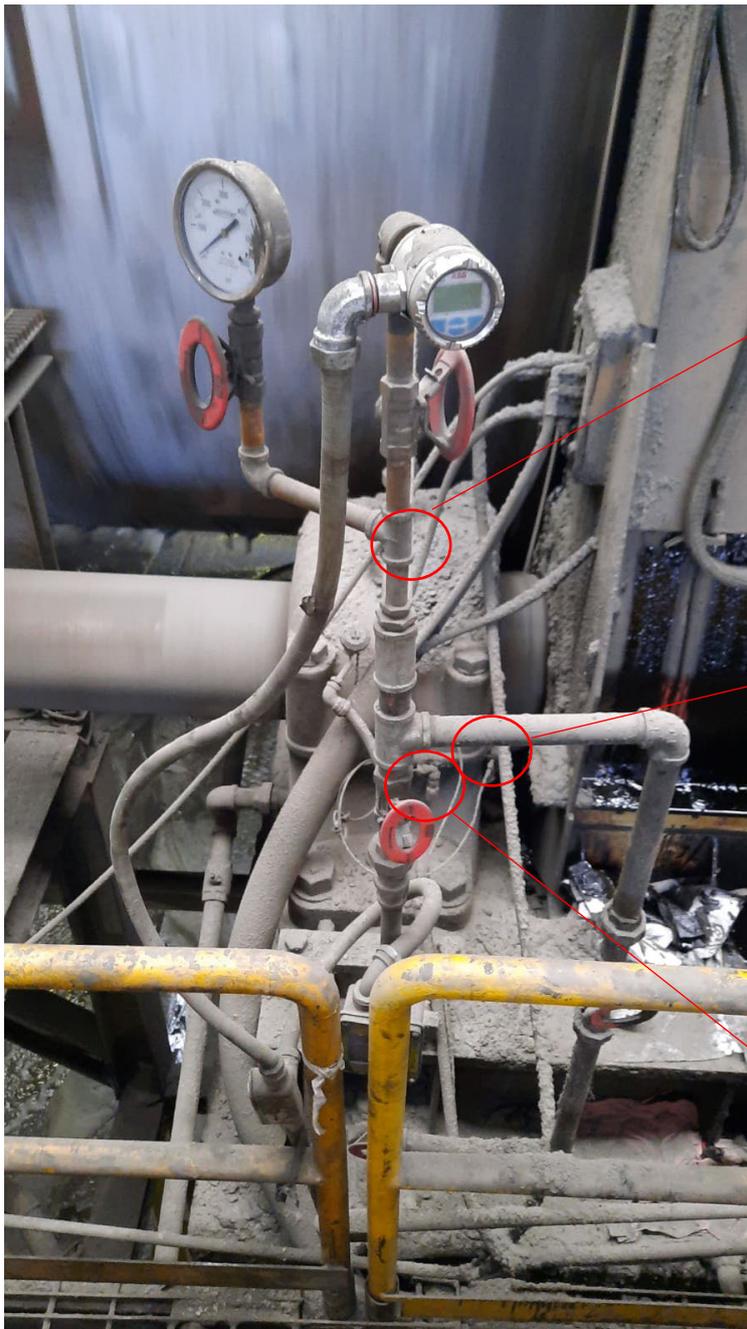
Nota. Elaboración propia

PUNTO 4 : LADO LIBRE DEL PIÑÓN

Se instalaron los sensores monoaxiales en las orientaciones vertical, horizontal y axial en el punto 4, lado acople del motor del molino, tal como se muestra en la figura 67. A cada sensor se extiende cableado al módulo del AMS 2600, para luego codificar la señal.

Figura 67

Punto 4, lado libre del piñón



PUNTO 4V:
DIRECCIÓN VERTICAL

PUNTO 4A:
DIRECCIÓN AXIAL

PUNTO 4H:
DIRECCIÓN HORIZONTAL

Nota. Elaboración propia

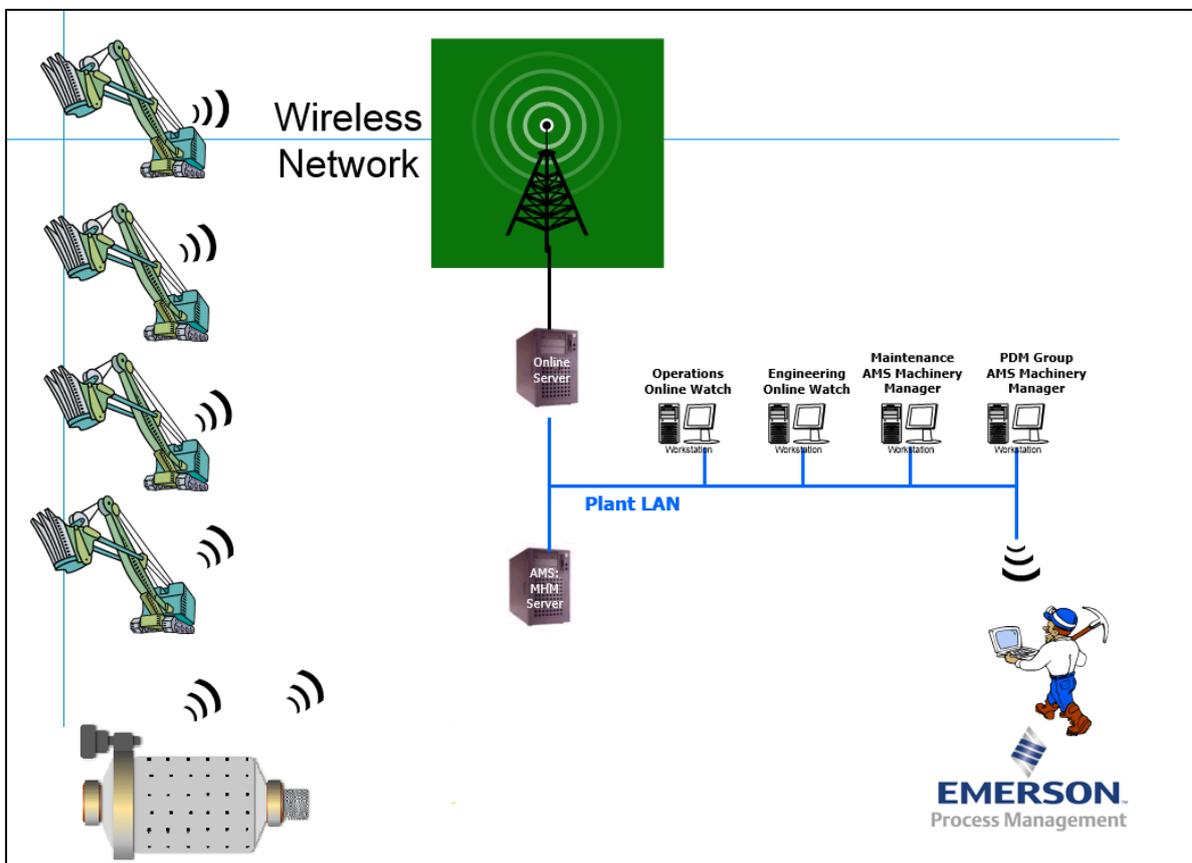
5.3 EVALUACIÓN

Descripción de la comunicación

En la figura 68 se muestra una red de comunicación que se dirige desde el molino hacia el DISPATCH, que a la vez funcionan como repetidores de la señal, y se dirigen hacia el servidor con el cual se puede tener acceso a la información desde cualquier computadora con el software incorporado, y ésta a la vez también sale por una fibra óptica hacia JOY GLOBAL WISCONSIN (las instalaciones), donde también informan al usuario sobre las alarmas que se están presentando.

Figura 68

Red de comunicación para el molino Kooper



Nota. Fuente: Emerson

Figura 69

Tendencia de los valores globales

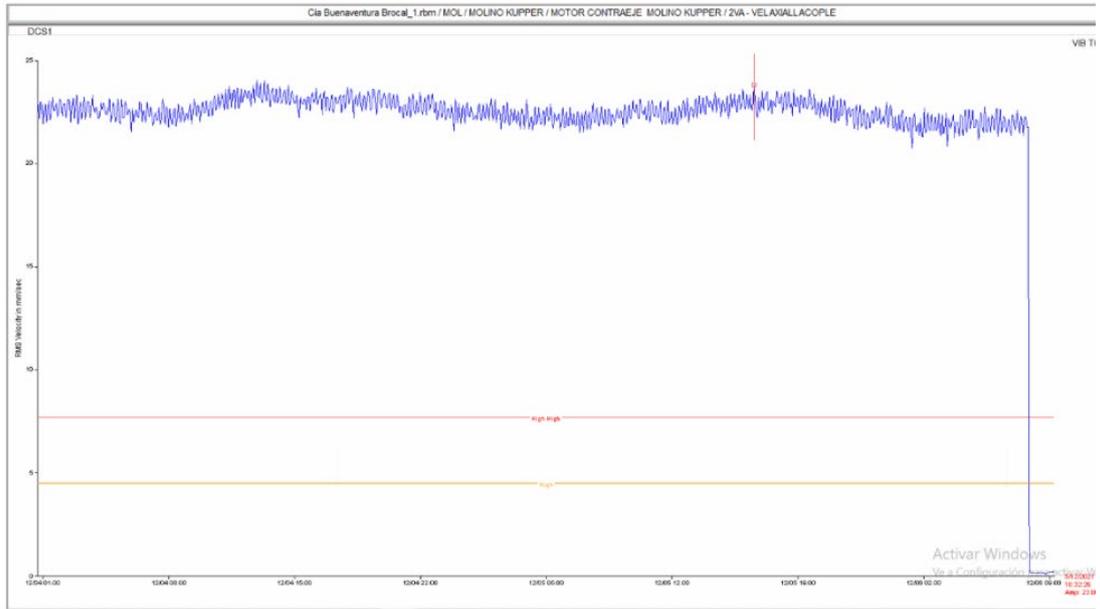
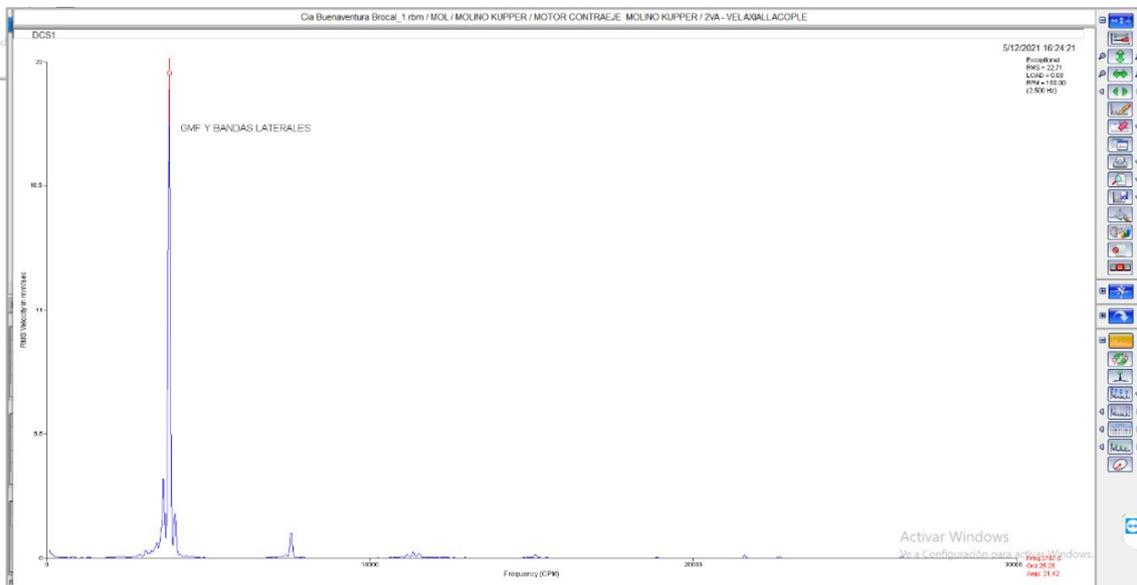


Figura 70

Tendencia de los espectros de la Vibración



Propuesta técnica – económica de la implementación

El servicio de mantenimiento predictivo será realizado por ingenieros y técnicos especialistas con experiencia comprobada y certificada. La compañía contratista será comprometida de la realización de los trabajos indicados según programación y la emisión de los reportes de los mismos. En la figura 71 se muestra la producción total de mineral tratado en toneladas métricas en el año 2021

Figura 71

Producción de mineral tratado en unidad minera

Producción													
Producción	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Mineral Tratado Planta C. (TM)	77,500	65,000	76,250	75,000	75,000	73,750	77,500	70,000	73,750	75,000	75,000	76,250	890,000
Contenido Fino (TMF)	399	401	409	466	470	478	482	499	491	467	557	591	5,709
Costo Unitario Método Anterior (US\$/TT Planta C.)													
AREAS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Mina B2	7.6	8.8	7.9	9.0	9.2	9.5	8.0	8.8	8.5	8.7	8.2	7.8	8.5
Planta Concentradora B2	11.3	35.7	13.1	12.0	15.0	11.4	11.9	31.4	12.4	13.7	10.8	11.3	15.5
Mantenimiento B2	2.0	2.2	2.3	1.9	2.1	1.8	2.0	1.9	2.2	1.9	1.8	2.3	2.0
Energía B2	4.0	4.9	3.9	4.1	3.8	3.9	3.9	4.4	3.8	4.0	3.8	3.8	4.0
Apoyo B2	5.6	6.9	5.9	6.1	6.3	5.9	5.8	6.9	6.1	5.8	5.9	5.9	6.1
TOTAL	30.4	58.5	33.1	33.1	36.4	32.5	31.7	53.4	33.0	34.1	30.5	31.0	36.1

Nota. Elaboración propia.

En la Unidad minera se produce 890 mil Toneladas de mineral tratada – Planta 1, por año estos datos están referenciados al año 2021, desde enero a diciembre, Ahora la producción total, traducido en ingresos netos para cada área en específica, en la planta 1, donde se ubica el molino, tiene un presupuesto en los siguientes puntos.

Figura 72

Presupuesto para la planta 1

P_ENE	P_FEB	P_MAR	P_ABR	P_MAY	P_JUN	P_JUL	P_AGO	P_SET	P_OCT	P_NOV	P_DIC	2021
589,180	570,936	599,822	674,866	687,251	700,134	619,563	616,396	627,864	651,890	617,064	596,760	7,551,725
873,368	2,320,041	1,000,436	897,714	1,127,059	837,565	925,610	2,196,712	917,513	1,028,668	811,677	858,215	13,794,578
154,266	139,902	175,739	145,236	158,279	135,285	158,785	135,340	160,762	141,156	135,383	176,837	1,816,970
310,649	321,670	297,708	310,112	282,637	289,911	303,310	309,146	277,555	297,189	281,878	286,701	3,568,467
430,211	447,618	447,769	456,229	473,133	432,371	451,248	482,786	450,683	438,297	440,988	446,564	5,397,897
2,357,674	3,800,168	2,521,474	2,484,157	2,728,358	2,395,267	2,458,516	3,740,379	2,434,377	2,557,200	2,286,990	2,365,077	32,129,637

En la figura 72, se evidencia un presupuesto de US\$ 32,129,637 .00 para el área donde se encuentra el molino, estos gastos están relacionados al mantenimiento correctivo con una suma de (US\$ 1, 816, 970 .00), energía, planta, apoyo y en mina donde las actividades cotidianas son de manera constante.

Se analizó las horas de detención de planta 1 observamos que el molino Kooper paró 340 horas en el rango de tiempo de la semana 23 hasta la semana 53 del 2021, esto se traduce en costos a US\$ 3, 069.26 por horas de mantenimiento correctivo (paradas).

En la figura 71 se evidencia el presupuesto de la propuesta, donde el valor total es de US\$ 40, 680 .00, esto conlleva al servicio del análisis vibracional, el monitoreo online y la instalación incluyendo la subida del personal por el tiempo que dure el servicio.

Figura 73

Propuesta Económica

ITEM	QTY	DESCRIPCION	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
SERVICIO DE ANÁLISIS AVANZADO				
01	03	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo online AMS 2600 - Instalación temporal de los sensores, cables, entre otros accesorios necesarios para el monitoreo. - Se realizará monitoreo remoto desde las oficinas Lima. - Duración 30 días (24/7) - Duración por los meses del 06 de Octubre al 05 de Enero 	10,000.00	30,000.00
SUBIDA DEL PERSONAL PARA LA INSTALACIÓN DE SENSORES (POR EL TIEMPO QUE DURE EL SERVICIO)				
02	01	<ul style="list-style-type: none"> - 02 Especialistas Stand by en el hotel de Lima. - Hospedaje y alimentación de cuarentena en Lima. - EPPS covid. 	340.00	340.00
<p><i>*Precios no incluyen IGV (18 %).</i></p> <p><i>*Se ha considerado subir a mina, para el retiro de los equipos instalados temporalmente.</i></p>				

Después de la implementación de la propuesta, según las horas de detención que fueron 1.18 Hrs y una falla correctiva, se traduce en costos una suma de US\$ 5, 456.00

¿Cuánto vamos ahorrar por parada de planta?

En la planta 1 por cada hora que estemos parando ahorramos aproximadamente el monto de US\$ 3, 053.00, un ahorro de US\$ 1, 038,093.00 en costos. Por lo tanto, Cabe mencionar que este modo de falla implica parada de equipos críticos de planta.

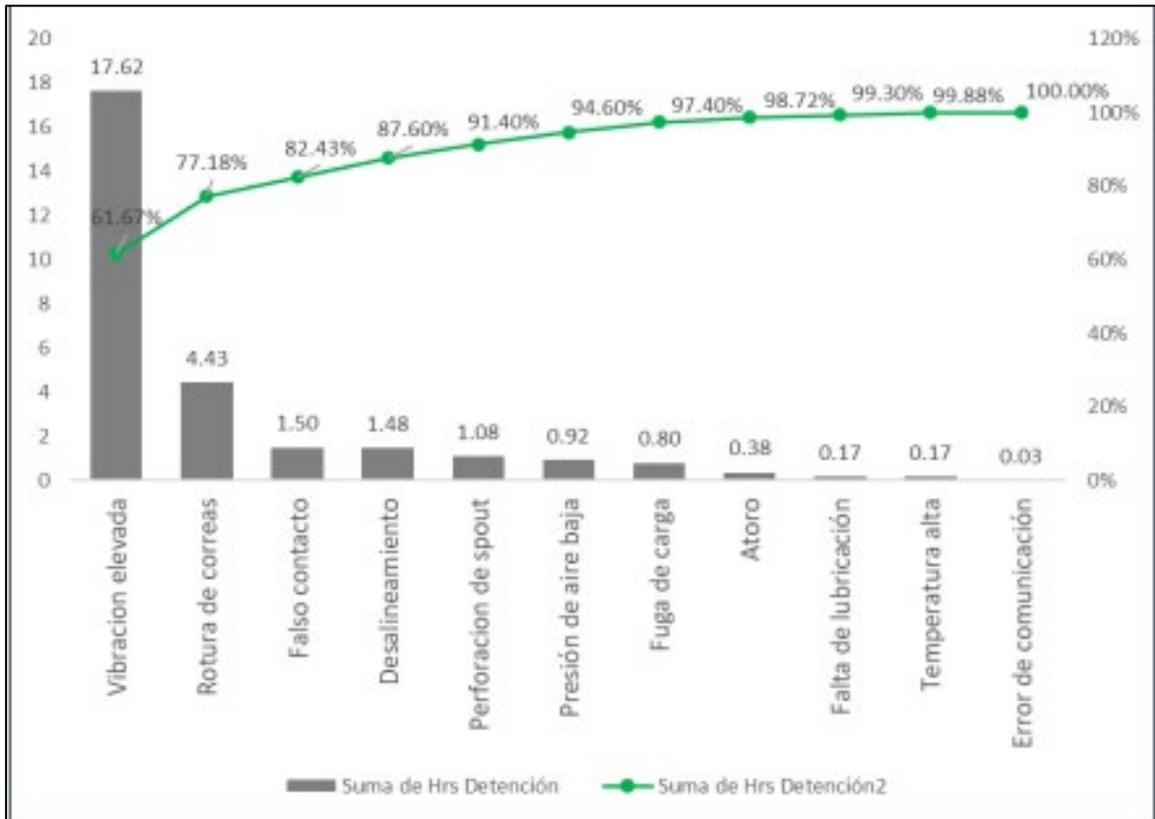
CAPITULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIONES DE RESULTADOS

6.1 Diagnóstico de la Disponibilidad antes de la Implementación del Sistema de Vibración y Sensado.

Figura 74

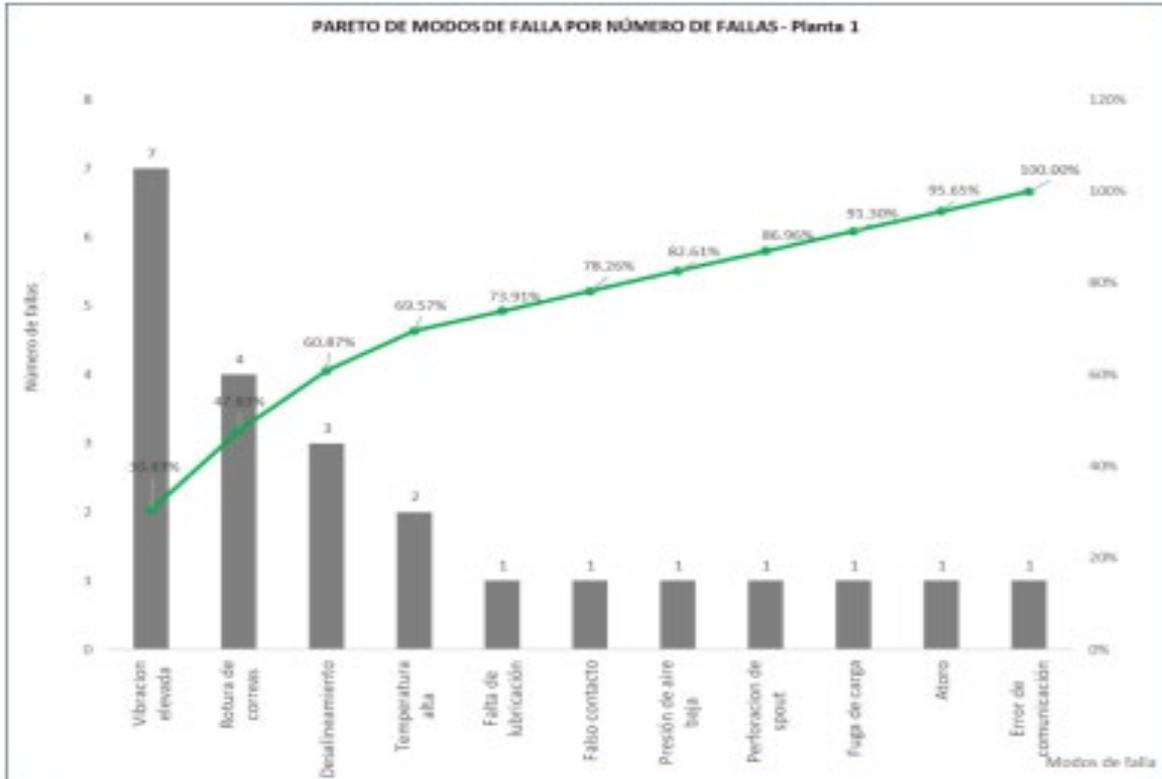
Diagrama de Pareto, modos de fallas por Horas detenidas, Planta 1



En la figura 74 se aprecia a través del diagrama de Pareto sobre los diferentes modos de fallas por horas detenidas en la planta 1, el modo con mayor implicancia es la vibración elevada (presencia de excesivas vibraciones en los lados acoples al piñón y motor del molino) en un 61.67%, por lo cual resulta urgente que se atienda, ya que genera un alto índice de horas de detención de la maquinaria y afecta directamente a los procesos de producción.

Figura 75

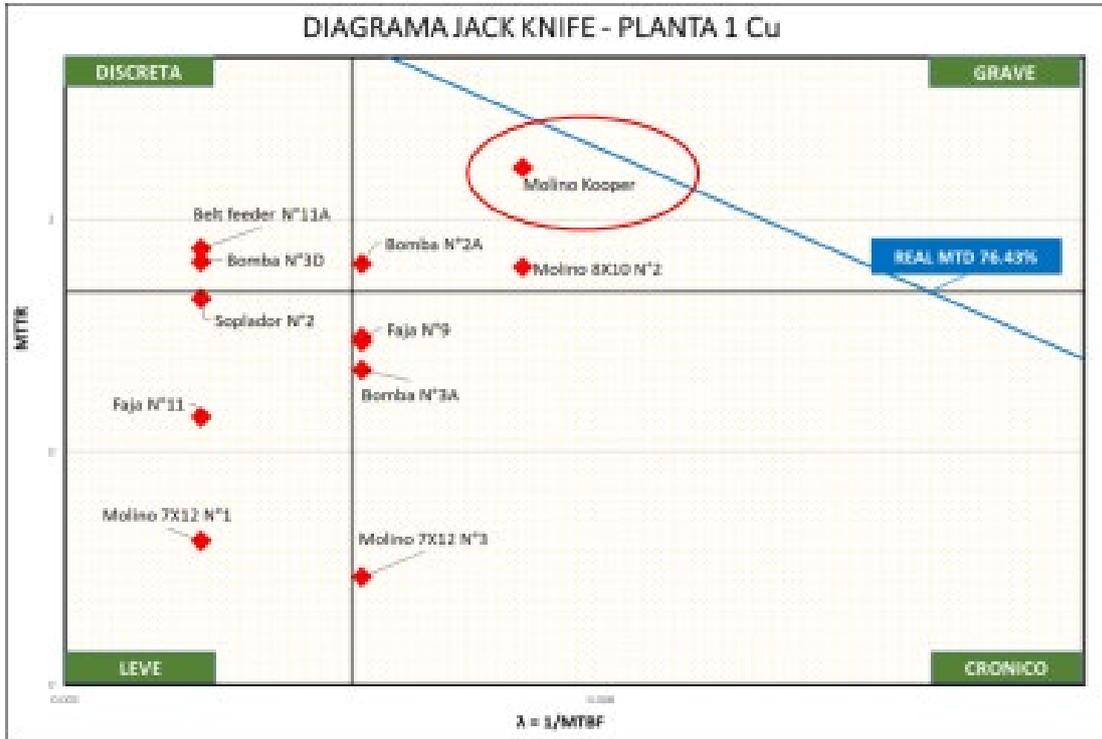
Diagrama de Pareto, modos de falla por número de fallas, Planta 1



En la figura 75 se puede apreciar a través del diagrama de Pareto sobre la cantidad de falla por el tipo o modo de éstas. Las que tienen mayor impacto son la vibración elevada (presencia de excesivas vibraciones en los lados acoples al piñón y motor del molino) y rotura de correas con un 78.26%, por lo cual resulta urgente que se atienda, ya que genera un alto número de fallas, 7 y 11, respectivamente, que están asociadas a las horas de detención de la maquinaria, que terminan impactando negativamente en los procesos de producción.

Figura 76

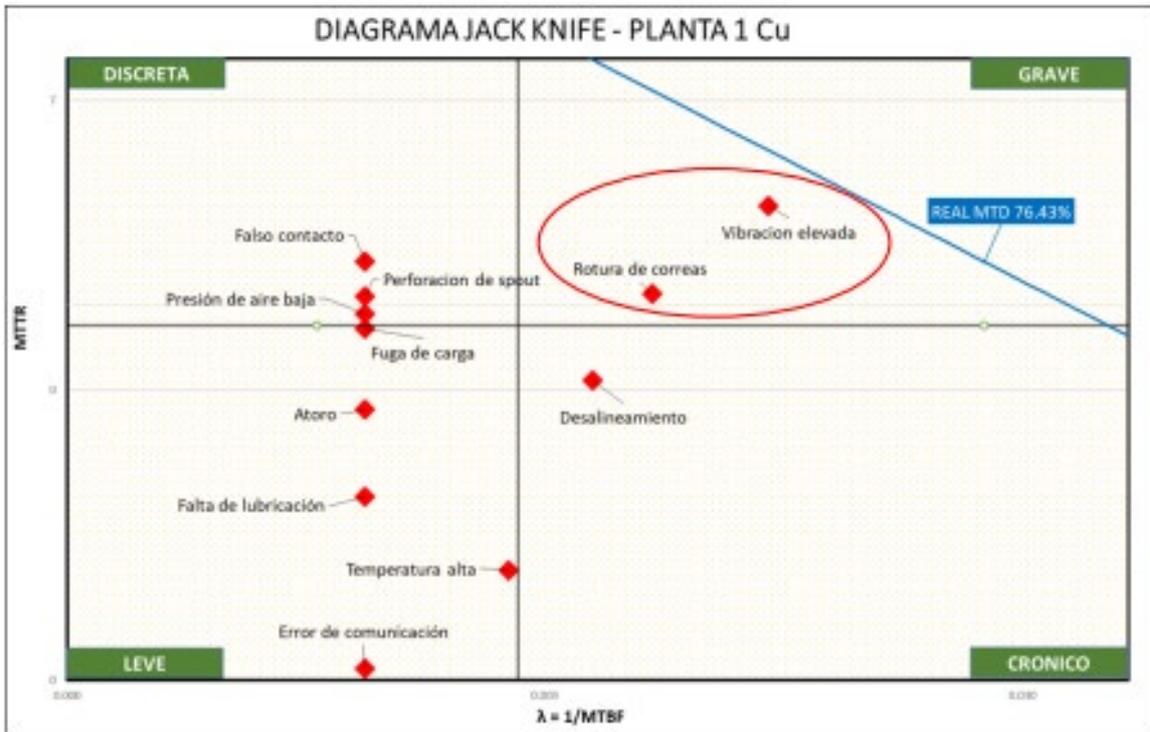
Diagrama de Jack Knife de los equipos de planta 1



En la figura 76 se puede apreciar a través del diagrama Jack Knife sobre el diagnóstico de los equipos de la planta 1 en función al cuadrante de gravedad reflejado en la disponibilidad (leve, crónico, discreta y grave). De ello se desprende que el equipo con mayor registro de confiabilidad baja, el molino Kooper es el más indisponible, por lo cual se entiende que la producción encargada se ve seriamente afectada, ya que no trabaja eficientemente por sus bajos niveles de disponibilidad.

Figura 77

Diagrama de Jack Knife de modos de falla en los equipos de la Planta 1



En la figura 77, se puede apreciar, a través del diagrama Jack Knife, sobre las fallas más recurrentes en los equipos que obliga a ubicarlos en función al cuadrante de gravedad reflejado en la disponibilidad (leve, crónico, discreta y grave). De ello se desprende que las fallas en mayor número que conducen a que el equipo sea más indisponible son la vibración elevada (presencia de excesivas vibraciones en los lados acoples al piñón y motor del molino) y la rotura de correas, por lo cual se entiende que la producción encargada se ver seriamente afectada, ya que no se tiene un aliado en el diagnóstico que permita alertar las fallas de los equipos, en este caso del molino Kooper, que a medida que se incrementan las fallas, bajan los niveles de disponibilidad.

Figura 78

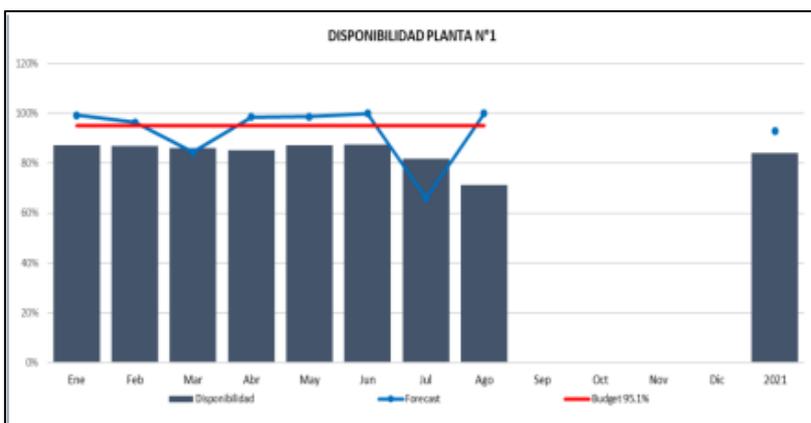
Disponibilidad de la planta de producción de Cu, agosto 2021



En la figura 78 se puede apreciar que la disponibilidad diaria de la planta de Cu del mes de agosto se relaciona con la producción de todos los molinos, que se asume en 3 121 toneladas por día, y la disponibilidad mensual se encuentra en un total de 71,2%. Si se hace un análisis de la disponibilidad diaria, se observan oscilaciones que van de 45% hasta 100%, que de modo mensual es menor al 75% conforme a lo afirmado en el párrafo anterior. Entonces, la afectación de la disponibilidad impide el cumplimiento de los procesos de producción.

Figura 79

Disponibilidad mensual de los equipos

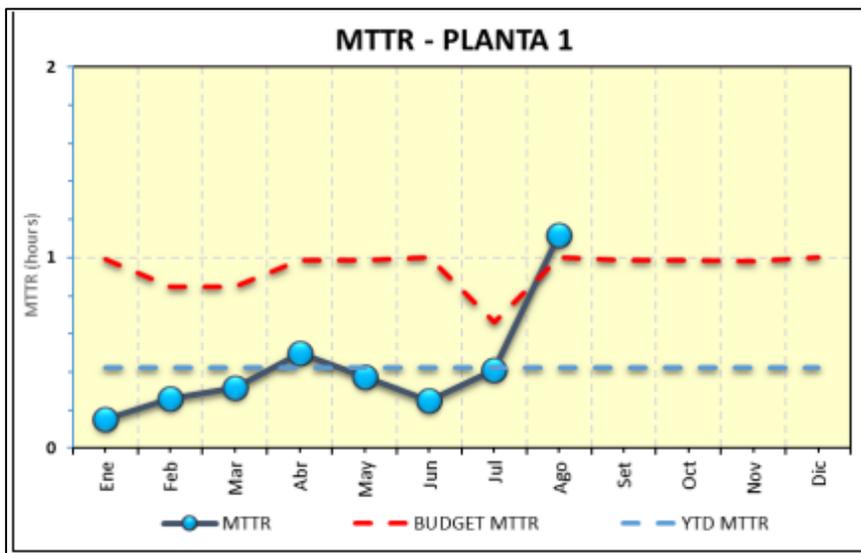


En la figura 79, se puede apreciar que la disponibilidad mensual es menor al 80% para el mes de agosto. Si se hace un análisis desde el mes de enero, se puede observar

que la baja en los niveles de disponibilidad se dio en julio, y que se acentuó en el mes de agosto. Por consiguiente, fue fundamental tomar este mes como referencia de la disponibilidad de los dispositivos de la planta 1.

Figura 80

MTTR de Planta 1 antes de la implementación



En la figura 80 se puede estimar que el MTTR de los equipos de la planta 1 reflejan un incremento en sus valores desde el análisis del mes de enero hasta agosto. Entonces, a medida que crece el valor de dicho indicador se refleja bajas en la disponibilidad de los aparatos de la mencionada planta. Además, éste no concuerda con el promedio real del MTTR, que aseguraría la disponibilidad para el curso normal de la producción en la planta minera. Por último, que el presupuesto mensual del MTTR se aprecia ligeramente incrementado. Por lo anterior, conviene tomar decisiones para la mejora de los valores del MTTR que asegure la disponibilidad de los equipos.

En la tabla N° 5 se muestra la disponibilidad, MTBF y MTTR del molino antes de la implementación del sistema de sensado.

Tabla 5

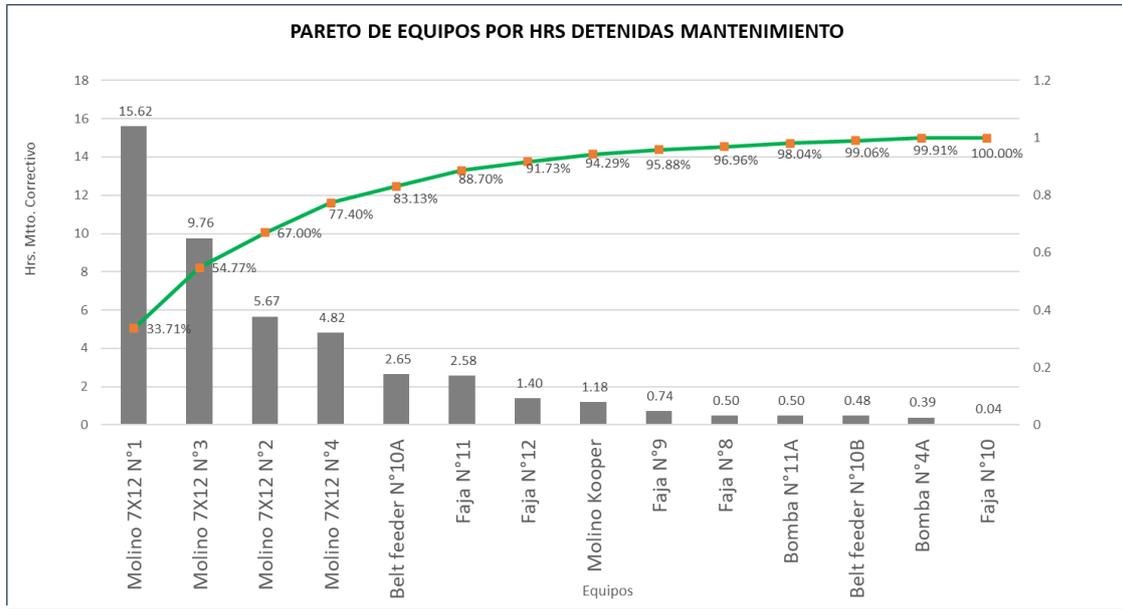
Disponibilidad del molino Kooper antes de la implementación.

ANTES DE LA IMPLEMENTACION - 2021				
muestra	semana	MTTR	MBTF	DISPONIBILIDAD
muestra 1	Sem23	7.06	29.65	79.21%
muestra 2	Sem24	2.63	16.62	87.35%
muestra 3	Sem25	0.61	9.21	88.11%
muestra 4	Sem26	0.17	27.99	96.24%
muestra 5	Sem27	0.22	36.71	94.22%
muestra 6	Sem28	0.11	35.89	80.72%
muestra 7	Sem29	10.29	26.07	14.29%
muestra 8	Sem30	3.08	19.96	79.76%
muestra 9	Sem31	1.00	23.00	95.83%
muestra 10	Sem32	0.59	15.98	58.07%
muestra 11	Sem33	0.19	33.77	65.71%
muestra 12	Sem34	1.55	13.29	92.86%
muestra 13	Sem35	1.29	36.83	91.72%
muestra 14	Sem36	0.36	19.23	94.11%
muestra 15	Sem37	1.26	57.55	93.27%
muestra 16	Sem38	0.23	58.44	94.19%
muestra 17	Sem39	1.07	23.31	94.44%
muestra 18	Sem40	0.73	38.82	90.30%
muestra 19	Sem41	0.75	15.64	93.03%
muestra 20	Sem42	2.75	39.71	90.12%
muestra 21	Sem43	1.78	31.26	93.68%
muestra 22	Sem44	0.10	33.70	91.80%
muestra 23	Sem45	0.05	63.98	90.80%
muestra 24	Sem46	1.08	58.09	81.24%
muestra 25	Sem47	0.29	50.92	89.04%
muestra 26	Sem48	0.00	90.43	95.83%
muestra 27	Sem49	0.10	60.33	95.43%
muestra 28	Sem50	0.22	88.26	94.93%
muestra 29	Sem51	0.24	21.08	88.38%
muestra 30	Sem52	1.57	8.40	88.82%
muestra 31	Sem53	0.26	43.58	95.75%
		1.34	36.38	86.43%

6.2 Diagnóstico de la Disponibilidad después de la Implementación.

Figura 81

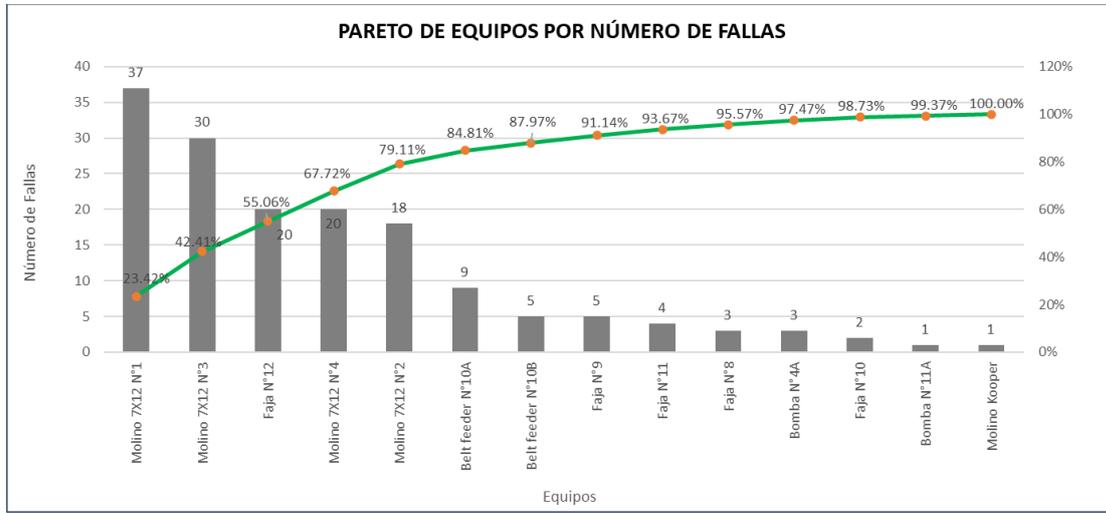
Diagrama de Pareto de los equipos por Horas detenidas



Luego de la Ejecución de un sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional del molino Kooper 16.5 x 23, se presentan los siguientes resultados: Se puede apreciar en el diagrama de Pareto de equipos por horas de detención de la Planta 1, que el molino 7x12 N° 1, como se muestra en la figura 81, es el equipo más indisponible de la Planta 1, teniendo 15.62 horas de detención desde la semana 15 hasta la semana 45 del 2022.

Figura 82

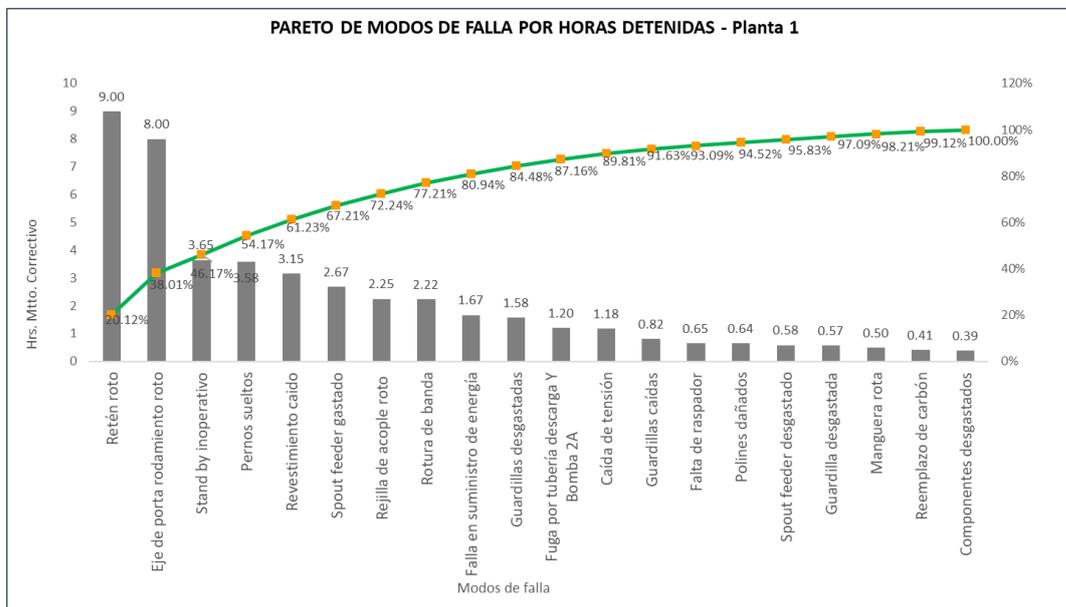
Diagrama de Pareto de los equipos en el Planta 1



Se evidencia que en diagrama de Pareto de la figura 82, el numero de fallas de la Planta 1 que el molino 7x12 N° 1 es el equipo más indisponible de las Planta 1, teniendo 37 veces de detención desde la semana 15 hasta la semana 45 del 2022.

Figura 83

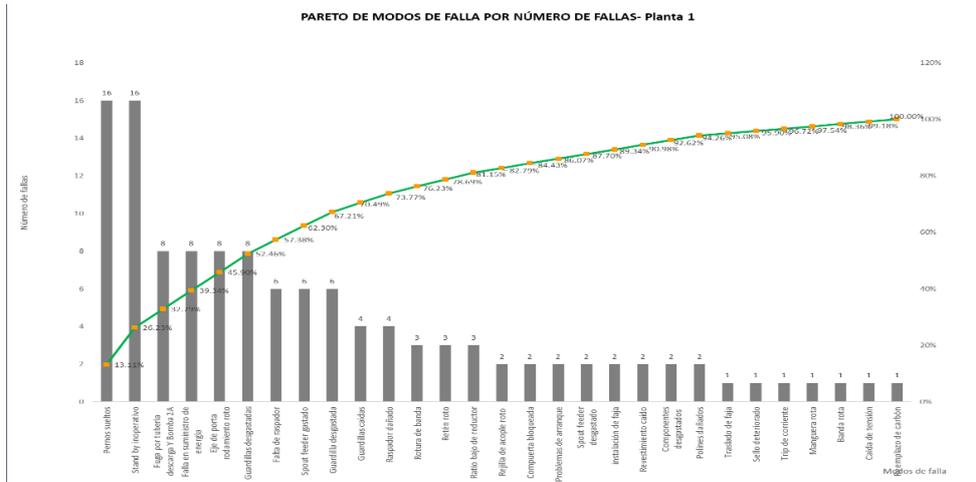
Diagrama de Pareto de modos de falla por horas detenidas



En el Diagrama de Pareto de modales de fallas por horas de detención de la Planta 1, como se muestra en la figura 81, el retén roto es el modo de falla más indisponible de la planta 1, teniendo 9 horas de detención desde la semana 15 hasta la semana 45 del 2022.

Figura 84

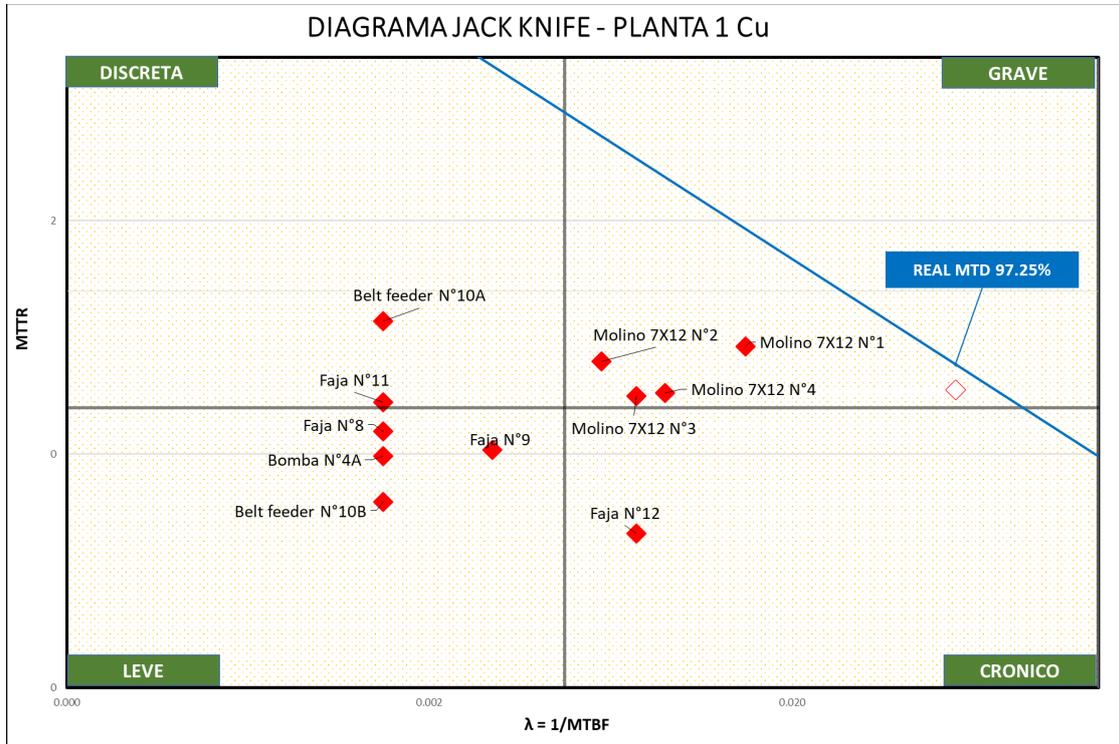
Diagrama de Pareto de modo de falla por número de fallas en la Planta 1



Se puede estimar en el diagrama de Pareto de modos de fallas por número de fallas de planta 1, tal como se muestra en la figura 84, los pernos sueltos es el modo de falla más indisponible de planta 1, teniendo 16 veces de detención desde la semana 15 hasta la semana 45 del 2022.

Figura 85

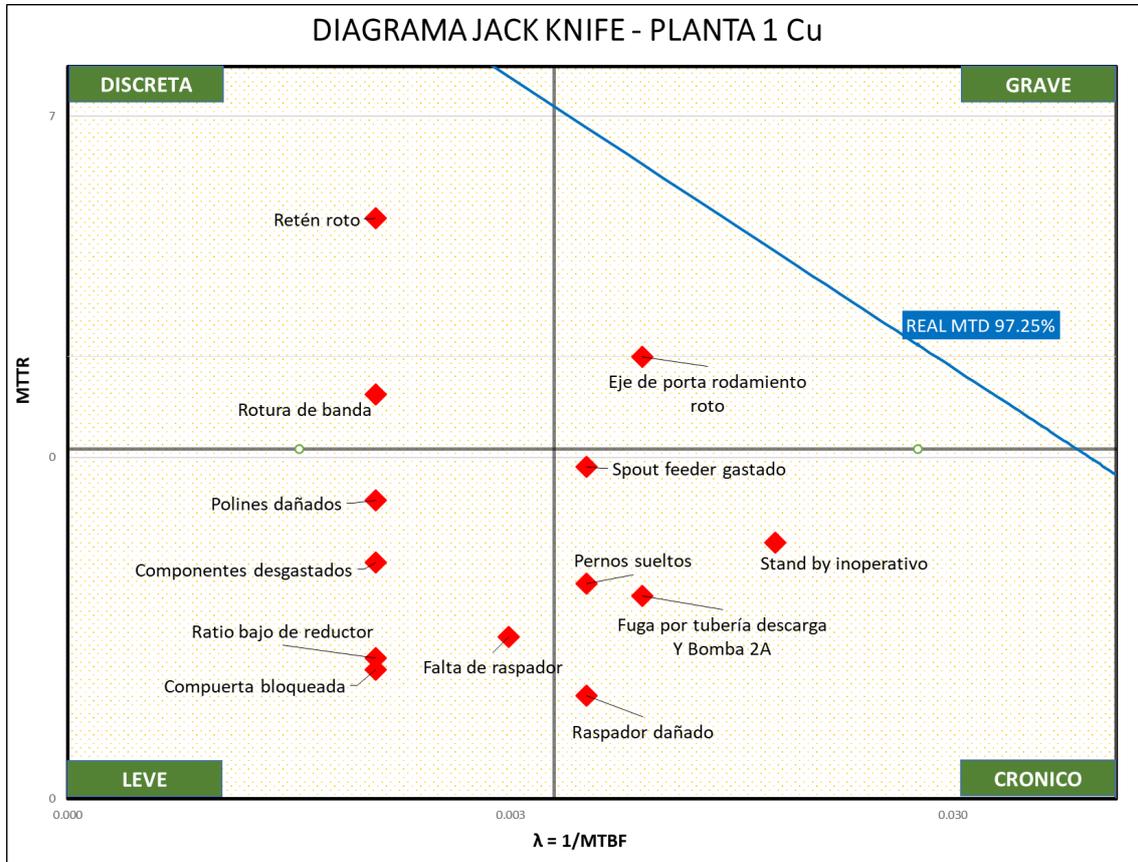
Diagrama de Jack Knife - fallas , MTTR de equipos, planta 1



Podemos ver en el diagrama de Jack Knife, donde se hace un match de tasa de fallas y MTTR de equipos de la planta 1, tal como se muestra en la figura 85, vemos que el molino 7 x 12 N°1 es el más indisponible de planta 1, teniendo considerando desde la semana 15 hasta la semana 45 del 2022.

Figura 86

Diagrama de Jack Knife - fallas, MTTR de modos de falla, Planta 1



Podemos ver en el diagrama de Jack Knife, donde se hace un match de tasa de fallas y MTTR de modos de falla de planta 1, como se muestra en la figura 86, vemos que el eje de porta rodamiento roto es el más indisponible de planta 1, desde la semana 15 hasta la semana 30 del 2021.

En la tabla 6 se muestra la disponibilidad del molino Kooper después de la implementación mostrando los indicadores MTBF y MTTR, según las 31 muestras registradas durante el periodo de 7 meses del año 2022, específicamente desde el 3/04/2022 el primer día de la semana 15 hasta el 5/11/2022, último día de la semana 45.

Se tomo a los meses de enero, febrero y marzo del 2022 para la ejecución de la propuesta.

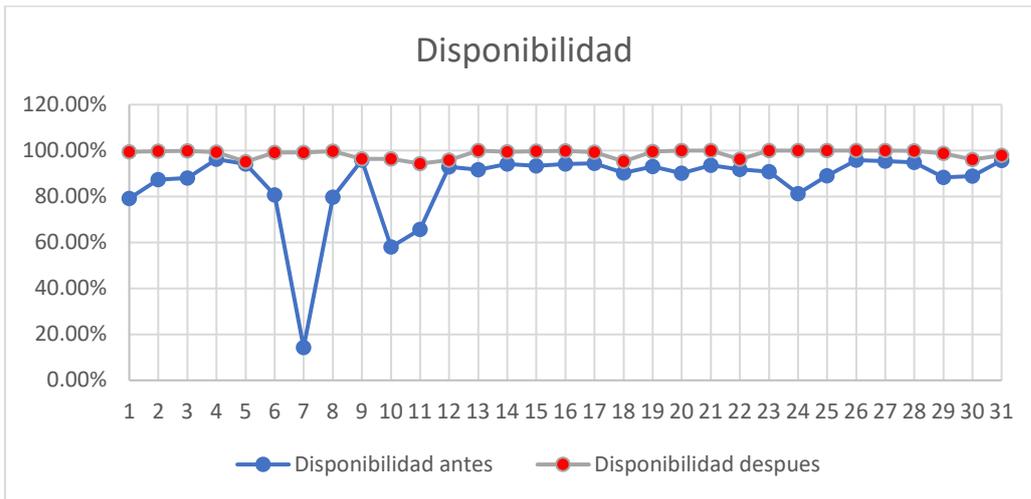
Tabla 6*Disponibilidad del molino Kooper después de la implementación*

DESPUES DE LA IMPLEMENTACION				
		MTRR	MBTF	DISPONIBILIDAD
muestra 1	Sem15	0.16	45.87	99.39%
muestra 2	Sem16	0.07	82.12	99.76%
muestra 3	Sem17	0.14	94.47	99.87%
muestra 4	Sem18	0.11	36.71	99.27%
muestra 5	Sem19	0.75	57.40	95.15%
muestra 6	Sem20	0.14	56.49	99.16%
muestra 7	Sem21	0.20	34.81	99.21%
muestra 8	Sem22	0.19	68.49	99.71%
muestra 9	Sem23	0.30	47.71	96.34%
muestra 10	Sem24	0.39	34.94	96.33%
muestra 11	Sem25	0.24	57.42	94.34%
muestra 12	Sem26	0.15	21.52	95.89%
muestra 13	Sem27	0.00	86.99	100.00%
muestra 14	Sem28	0.16	45.87	99.39%
muestra 15	Sem29	0.07	82.12	99.76%
muestra 16	Sem30	0.14	94.47	99.87%
muestra 17	Sem31	0.11	36.75	99.27%
muestra 18	Sem32	0.58	70.28	95.30%
muestra 19	Sem33	0.11	56.66	99.53%
muestra 20	Sem34	0.00	81.41	100.00%
muestra 21	Sem35	0.00	90.08	100.00%
muestra 22	Sem36	0.25	50.94	96.26%
muestra 23	Sem37	0.00	92.69	100.00%
muestra 24	Sem38	0.00	86.84	100.00%
muestra 25	Sem39	0.00	93.85	100.00%
muestra 26	Sem40	0.00	95.51	100.00%
muestra 27	Sem41	0.00	93.84	100.00%
muestra 28	Sem42	0.00	95.35	99.93%
muestra 29	Sem43	0.23	30.28	98.81%
muestra 30	Sem44	0.39	9.34	96.06%
muestra 31	Sem45	0.32	83.68	97.91%
		0.17	65.00	98.60%

En la figura 87 se aprecia la comparación en la mejora de la disponibilidad del molino Kooper antes y después de la ejecución del sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional.

Figura 87

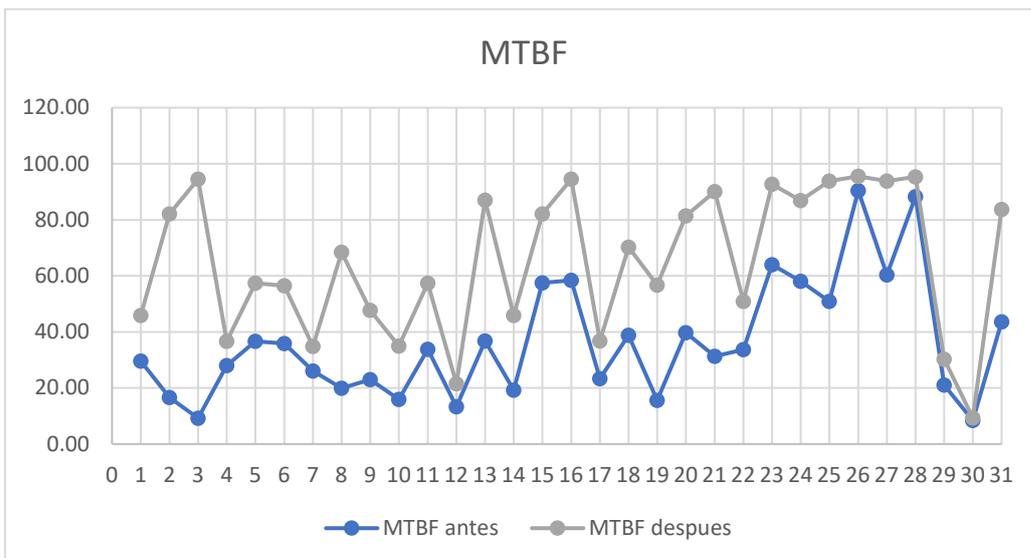
Comparación de la Disponibilidad del molino Kooper



En la figura 88 se aprecia la comparación del MTBF tanto antes y después de la implementación del sistema de sensado.

Figura 88

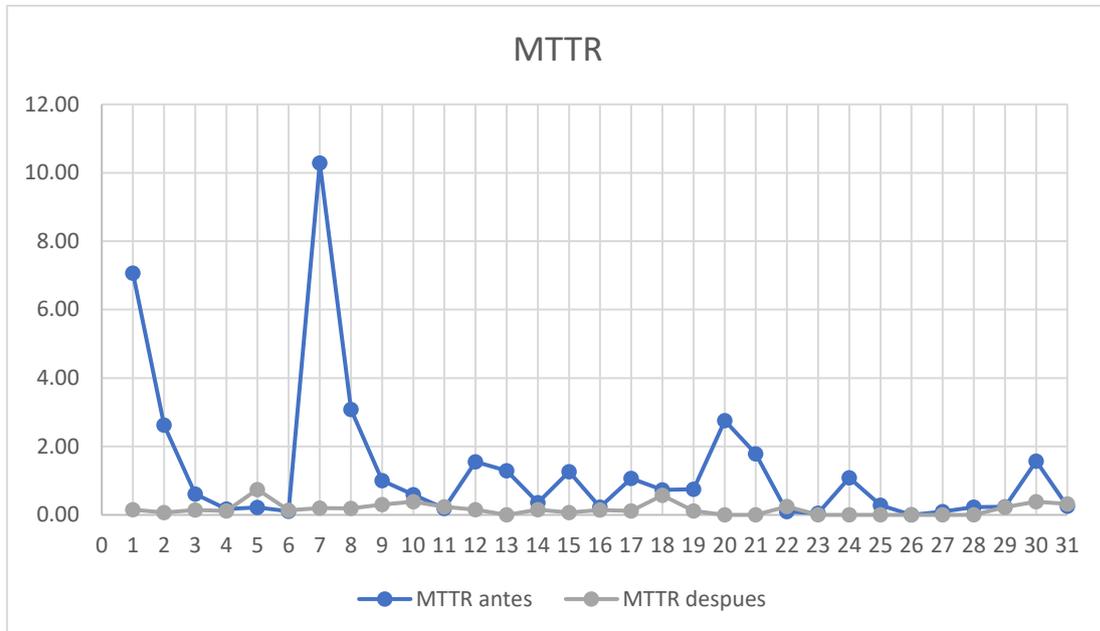
Comparación del MTBF del molino Kooper



En la figura 89 se aprecia la comparación del MTBF tanto antes y después de la implementación del sistema de sensado.

Figura 89

Comparación del MTTR del molino Kooper



6.3 Resultados Estadísticos

Ahora veremos los efectos estadísticos del objetivo general (disponibilidad) y de los objetivos específicos (MTBF) - (MTTR), iniciando con el análisis descriptivo, el análisis inferencial y por último la prueba de hipótesis para cada indicador trabajado en los objetivos del proyecto del estudio, donde se pide el pretest y postest de la implementación de un sistema de sensado y monitoreo online. Estas pruebas se realizan con los datos de los cuadros vistos anteriormente de cada indicador.

A. Análisis descriptivo

Para esta primera prueba usaremos el software SPSS, versión 26, para poder analizar el pretest y postest de la disponibilidad, (MTBF) – (MTTR). A continuación, se verán los cuadros del análisis descriptivo de cada indicador.

A.1. Disponibilidad del Molino de bolas Koppers 16.5 x 23.

Tabla 7

Disponibilidad del molino Kooper pre y post test

Estadísticos descriptivos

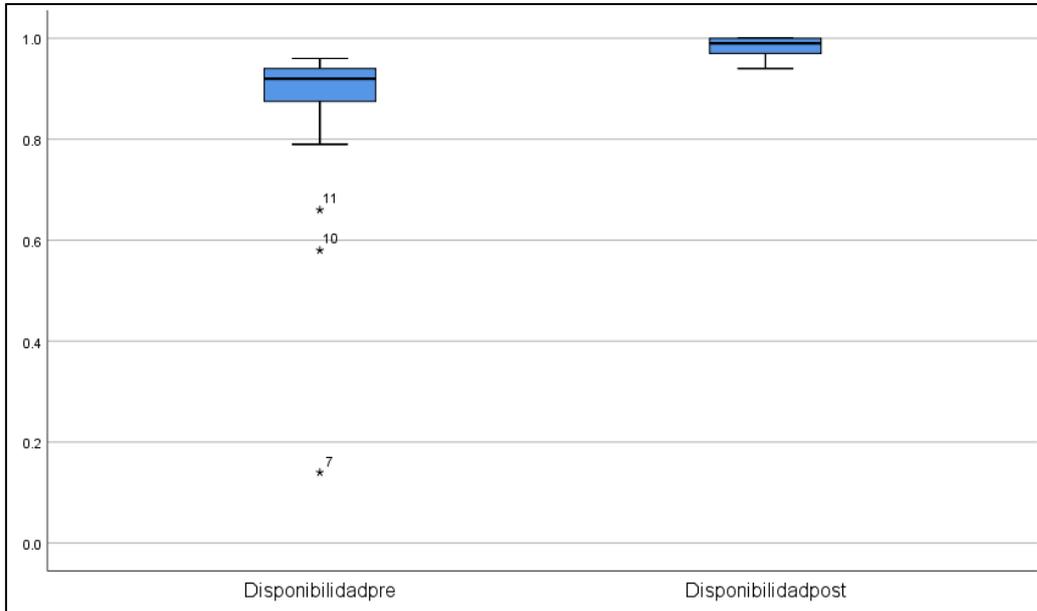
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
Disponibilidad_pre	31	0.140	0.960	0.86432	0.160035
Disponibilidad_post	31	0.940	1.000	0.98548	0.019294
N válido (por lista)	31				

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

Descripción: A continuación, en la tabla 7 se observa el análisis descriptivo de la disponibilidad, donde se obtiene el valor mínimo del pretest y postest, siendo los valores 0.14 y 0.94, y como valores máximos se tiene para el pretest y postest 0.96 y 1. Ahora, se tienen los datos de la media de la disponibilidad, los cuales son 0.86432 para el antes y 0.98548 para el después de la implementación. Se observa la variación de 14.08% entre el antes y después de la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera, como se muestra en la figura 90.

Figura 90

Gráfico en el SPSS de la disponibilidad del pretest y posttest



Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

A.2. Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)

Tabla 8

MTBF del molino Kooper del pre y post test

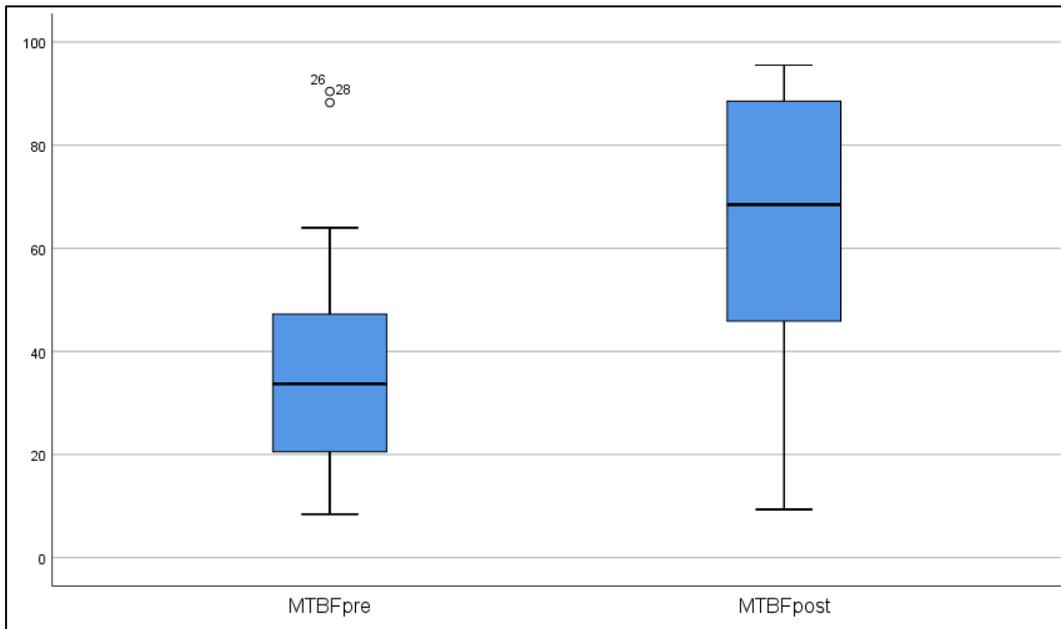
Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
MTBF_pre	31	8.400	90.430	36.37742	21.084079
MTBF_post	31	9.340	95.510	64.99677	25.785631
N válido (por lista)	31				

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

Descripción: En la tabla 8 se observa el análisis descriptivo del MTBF, donde los valores mínimos del pretest y post test son 8.4 y 9.34, y como valores máximos se tiene que para el pretest y posttest son 90.43 y 95.51. Ahora, se tiene la data de la media del MTBF, los cuales son 36.37742 para el antes y 64.99677 para el después de la implementación. En el grafico se observa una variación del 78.67% entre el antes y después del MTBF del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera, como se muestra en la figura 91.

Figura 91

Gráfico en el SPSS de la Tiempo Medio entre Fallas del pretest y postest.



Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

A.3. Tiempo Medio para Reparar (MTTR)

Tabla 9

MTTR del molino Kooper del pre y post test

Estadísticos descriptivos

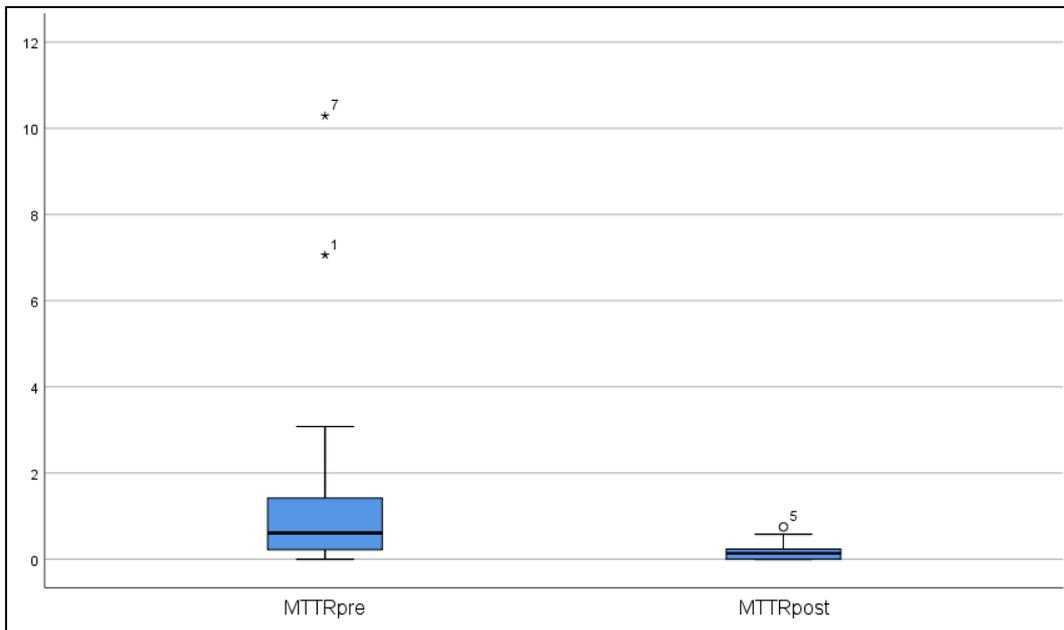
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
MTTR_pre	31	0.000	10.290	1.34290	2.166341
MTTR_post	31	0.000	0.750	0.16774	0.178040
N válido (por lista)	31				

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

Descripción: En la tabla 9 se observa el análisis descriptivo del tiempo medio para reparar (MTTR), donde se obtiene el valor mínimo del pretest y postest, siendo los valores 0.00 y 0.00, y como valores máximos se tiene para el pretest y postest 10.29 y 0.75. Ahora, se tiene los datos de la media del tiempo medio para reparar (MTTR), los cuales son 1.3429 para el antes y 0.16774 para el después de la implementación. En el gráfico se observa una variación del 87.51% entre el antes y después del tiempo medio para reparar (MTTR) del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera, como se muestra en la figura 92.

Figura 92

Gráfico en el SPSS de la Tiempo Medio para reparar del pretest y postest



Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

B. Análisis inferencial

Prueba de normalidad

Ahora se realizará la prueba de normalidad, que para Prabhaker et al. (2019) se realiza luego de la prueba de contrastación de hipótesis, que continúa después de esta prueba inferencial, ahora veremos la elaboración de la prueba inferencial para saber la normalidad de cada indicador que se está trabajando. Esta prueba se trabajará con Shapiro Wilk si la cuantía de muestras es menor a 50, o con la prueba de Kolmogórov-Smirnov si son mayor a 50 muestras, para lo cual utilizaremos el software SPSS.

Para indicar la normalidad se plantea las siguientes reglas:

H₀: Los datos del resultado de la productividad son **normales**.

H₁: Los datos del resultado de la productividad **no son normal**.

Donde se concluye a los siguientes puntos:

- La significancia $> 0,05$ → Se acepta la H₀.
- La significancia $\leq 0,05$ → Se acepta la H₁.

A.1. Disponibilidad del Molino de bolas

Tabla 10

Cuadro de normalidad de la disponibilidad

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Disponibilidad_pre	0.571	31	0.000
Disponibilidad_post	0.743	31	0.000

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25.

Interpretación: En la tabla 10 se aprecia la cuantía de la significancia del antes y después de la disponibilidad con la prueba de Shapiro Wilk, estando la significancia de 0.00 del antes de la implementación. Por lo tanto, es menor a 0,05, y la significancia del posttest es 0.000. Por lo tanto, al ser los valores de la significancia menor a 0.05, se acepta la hipótesis alterna, donde afirmamos que los datos del resultado de la productividad **no son normales**. tanto en el pre test y en el post test. Por tal motivo, se trabajará con la prueba de hipótesis de Wilcoxon.

A.2. Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)

<p>Ho: Los datos del resultado del MTBF son normales.</p> <p>H1: Los datos del resultado del MTBF no son normal.</p>
<p>Donde se concluye a los siguientes puntos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La significancia > 0,05 → Se acepta la H0. • La significancia <= 0,05 → Se acepta la H1.

Tabla 11

Cuadro de normalidad del MTBF

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
MTBF_pre	0.914	31	0.016
MTBF_post	0.910	31	0.013

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

Interpretación: En la tabla 11 se aprecia el valor de la significancia del antes y después del tiempo medio entre fallas (MTBF), siendo la significancia de 0.016 del antes de la implementación. Por tal motivo es inferior a 0.05, y la significancia del postest es 0.013. Por tal motivo es menor al valor de 0,05; entonces se acepta la hipótesis alterna, donde los datos del resultado del MTBF **no son normales**. Por tanto, se trabajará con la prueba de hipótesis mediante el test Wilcoxon.

A.3. Tiempo Medio para Reparar (MTTR)

<p>H₀: Los datos del resultado del MTBF son normales.</p> <p>H₁: Los datos del resultado del MTBF no son normales.</p>
<p>Donde se concluye a los siguientes puntos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La significancia > 0,05 → Se acepta la H₀. • La significancia <= 0,05 → Se acepta la H₁.

Tabla 12

Cuadro de normalidad del MTTR

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
MTTR_pre	0.591	31	0.000
MTTR_post	0.837	31	0.000

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

Interpretación: En la tabla 12 se muestra el valor de la significancia del antes y después del tiempo medio para reparar (MTTR), siendo la significancia de 0.00 del antes de la implementación; por ende, es menor a 0,05, y la significancia del postest es 0.00. Por tal motivo es menor al valor de 0,05. Se acepta la hipótesis alterna, donde los datos del resultado del MTTR **no son normales**. Por tanto, se trabajará con la prueba de hipótesis mediante el test de Wilcoxon. por lo cual se trabajará con la prueba de hipótesis mediante el test.

C. Prueba de hipótesis

Después de completar la prueba de normalidad, se llevará a cabo la prueba de Wilcoxon en caso de que las distribuciones no sigan una distribución normal, mientras que si las distribuciones son normales, se aplicará la prueba de T-Student, utilizando un nivel de significancia de 0.05.

A.1. Disponibilidad del Molino de bolas Koppers 16.5 x 23

H0: La implementación de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **no permite** mejorar la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

H1: La implementación de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **si permite** mejorar la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

Donde se tiene las siguientes reglas para la prueba de hipótesis:

- La significancia > 0,05.....Se acepta la (H0).
- La significancia <= 0,05.....Se acepta la (H1).

Tabla 13

Contrastación de hipótesis, Disponibilidad

Estadísticos de prueba

	Disponibilidad_post – Disponibilidad_pre
Z	-4.786 ^b
Sig. asintótica(bilateral)	0.000

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25

Interpretación: En la tabla 13 se muestra que el valor de la significancia del antes y después de la prueba de Wilcoxon es de 0.00; lo cual es menor a 0,05. Se acepta la hipótesis alterna, y afirmamos que la ejecución de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **si permite** mejorar la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

A.2. Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)

H0: La implementación de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional no permite mejorar el tiempo medio entre fallas (MTBF) del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

H1: La implementación de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **si permite** mejorar el tiempo medio entre fallas (MTBF) del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

Donde se tiene las siguientes reglas para la prueba de hipótesis:

- La significancia > 0,05.....Se acepta la (H0).
- La significancia <= 0,05.....Se acepta la (H1).

Tabla 14

Contrastación de hipótesis, MTBF

Estadísticos de prueba	
	MTBF post – MTBF pre
Z	-4.860 ^b
Sig. asintótica(bilateral)	0.000

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25.

Interpretación: En la tabla 14 se muestra que el valor de la significancia del antes y después de la prueba de Wilcoxon es de 0.000; lo cual es menor a 0,05. Finalmente, como resultado se determina que la ejecución de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **si permite** mejorar el MTBF del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

A.3. Tiempo Medio para Reparar (MTTR)

H0: La Implementación de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **no permite** mejorar el tiempo medio para Reparar (MTTR) del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

H1: La Implementación de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **si permite** mejorar el tiempo medio para Reparar (MTTR) del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

Donde se tiene las siguientes reglas para la prueba de hipótesis:

- La significancia > 0,05.....Se acepta la (H0).
- La significancia <= 0,05.....Se acepta la (H1).

Tabla 15

Contrastación de hipótesis, MTTR

Estadísticos de prueba	
	MTTR_post - MTTR_pre
Z	-4.032 ^b
Sig. asintótica(bilateral)	0.000

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

Nota. Elaborado con el Software de SPSS V25.

Interpretación: En la tabla 15 se muestra que el valor de la significancia del antes y después de la prueba de Wilcoxon es de 0.000; por ende, es menor a 0,05. Finalmente, como efecto se determina que la ejecución del sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **si permite** mejorar el MTTR del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

6.4 Discusión de resultados

La investigación se completó con éxito, logrando cumplir con los objetivos establecidos desde el principio, gracias a la ejecución efectiva del sistema de sensores y monitoreo en línea basado en el análisis vibracional en el molino de bolas en una compañía minera. Como resultados se obtuvieron mejoras en la disponibilidad, en el tiempo de fallas y en el tiempo de reparar.

Objetivo general

Con la ejecución del sistema de sensado y el monitoreo online del molino de bolas koppers 16.5 x 23 en el estudio de investigación para la prueba de la hipótesis general, se obtuvo el valor de la significancia del antes y después de la implementación mediante la prueba de Wilcoxon, siendo este valor 0.00; por ende es menor a 0,05, por lo que se acepta la hipótesis alterna, y afirmamos que la implementación de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional **si permite** mejorar la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 con los datos de la media de la disponibilidad, que son 0.86387 para el antes y 0.98548 el después de la implementación, presentando una variación del 14.08%, donde estos resultados son respaldados por el estudio de Gavidia & Rodríguez (2020). Evaluando el escenario inicial de los equipos molinos desmeduladores, hemos referido la presencia de fallas de diferentes tipos, de las cuales hemos podido precisar los indicadores de mantenimiento que representan disponibilidades del 89.65%, 88.941% y 90.37% para los molinos 1, 2 y 3, respectivamente.

a) Objetivo específico 1

Se analizó los indicadores (MTBF) y (MTTR) actual para determinar la situación actual de la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16,5x23, siendo el valor promedio de la disponibilidad de un 97.65%, donde se pudo evidenciar una mejoría con respecto al promedio de la disponibilidad al inicio, de un 89.55%. Estos resultados se comparan con los de Rosado (2022), donde los reportes detallados de la disponibilidad de los equipos involucrados para su estudio fueron de un promedio del 86.4%. Este dato se seleccionó a 14 equipos rotativos que han sido categorizados como críticos.

b) Objetivo específico 2

Se analizó los modos y efectos de falla (AMEF) para determinar las fallas potenciales de la planta 1 dentro de una compañía minera bajo criterios que se consideró importantes para evaluar la criticidad de los equipos. El procedimiento que se consideró fue evaluar los ponderados de criticidad en todos los aspectos posibles para poder estipular si un equipo es crítico o no. Estos resultados se respaldan con Aguilar y Maguiña (2010), donde se utilizó un proceso de evaluación de riesgos mediante la aplicación de la metodología de Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (FMECA o AMFEC), con el fin de detectar los modos de fallo de mayor riesgo. Esto permitió elegir la estrategia de mantenimiento más adecuada, que podría ser preventiva, predictiva, correctiva o, en ciertos casos, requerir acciones adicionales o complementarias.

c) Objetivo específico 3

Se propuso un sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional para disminuir las fallas del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera. La propuesta se realizó bajo tres procedimientos: Planificar (donde se describieron los objetivos que se plantean, y el flujo de trabajo para el análisis de sensado); implementación (donde se describió todo el proceso de análisis vibracional, desde los puntos de colocación hasta el proceso de lectura); finalmente el proceso de evaluar (donde se observa los resultados del análisis, para evidenciar una mejoría con la propuesta bajo monitoreo continuo). Estos resultados se respaldan con Leyva (2020). Se utilizó la técnica de análisis vibracional para identificar posibles fallos en los equipos ubicados en el área de lavado. En consecuencia, se estableció un plan para llevar a cabo análisis de vibraciones en los equipos críticos. Este plan permite detectar condiciones que pueden ser clasificadas como alerta, emergencia y normal. Para llevar a cabo este proceso, se emplea un dispositivo llamado SKF Microlog Analyzer serie GX - CMXA 75, que se encarga de recopilar datos de vibración.

d) Objetivo específico 4

Se determinó el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio para reparar (MTTR) después de la propuesta, para comparar la disponibilidad del molino de bolas

Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera, donde se obtuvo los valores promedios de 86.43% para el antes y 98.60% para el después de la implementación, evidenciando una variación del 14.08% en la disponibilidad del molino. Estos resultados son respaldados por el estudio de Gavidia y Rodríguez (2020), donde al emplear un plan de mantenimiento preventivo basado en el ACR, se presentan una mejoría en la disponibilidad de los tres molinos de 95.813%, 95.542% y 96.400%.

CONCLUSIONES

En el estudio se pudo implementar el sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional. Se muestra que el valor de la significancia del antes y después de la prueba de Wilcoxon es de 0.00, lo cual es menor a 0,05. Por ende, se concluye que la ejecución de un sistema de sensado y monitoreo online basado en el análisis vibracional sí permite mejorar la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

- a) Se pudo identificar la situación actual de la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16.5x23 durante un periodo de 7 meses, del mes de abril hasta diciembre del 2022, donde la disponibilidad promedio de las muestras fue de 86.43%.
- b) Se comparó el MTBF del molino de bolas Kooper 16.5 x23 antes y después de la implementación, donde se obtuvo los valores promedios de 36.38 para el antes y 65 para el después, presentándose una variación del 78.67%.
- c) Se comparó el MTTR del molino de bolas Kooper 16.5 x23 antes y después de la implementación, donde se obtuvo los valores promedios de 1.34 para el antes y 0.17 para el después, donde se observa una variación del 87.51%.
- d) Se comparó la disponibilidad del molino del molino de bolas Kooper 16.5 x23 antes y después de la implementación, donde se obtuvo los valores promedios de 86.43% para el antes y 98.60% para el después, donde se observa una variación del 14.08%.

RECOMENDACIONES

En la presente investigación se recomienda lo siguiente:

- a) Seguir el procedimiento adecuado en la ejecución del sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional para poder mejorar la disponibilidad del molino en futuras investigaciones inmersas en el campo y área.
- b) Contar con personales, técnicos y supervisores capacitados en el tema para llevar a cabo la ejecución del monitoreo online fundado en el análisis vibracional.
- c) Eliminar o reducir las paradas y arranques intempestivos, con la finalidad de mantener constantes los valores globales de vibración.
- d) Es importante relacionar las condiciones de operación con los valores de vibración (los espectros y las tendencias). Por lo tanto, se recomienda conocer y reportar las cargas del molino de manera diaria cuando se realiza la toma de medición.
- e) A la empresa propietaria del molino, que en la Planta 1 se realice la ejecución del sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional a los equipos críticos que se encuentren con una baja disponibilidad.

Referencias

- Aguilar, J., Torres, R., & Magaña, D. (2010). *Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/482/48215094003.pdf>
- Cadena-Clavijo, J. E., Hross Jurgschat., R., & Martínez, H. F. (2020). Sistema integrado de gestión de la información web para ejecución de procesos de evaluación sobre mantenimiento correctivo y fallas de maquinaria industrial. *MODUM: Revista Divulgativa Multidisciplinar de Ciencia*, 2(1), 63–76. Obtenido de https://revistas.sena.edu.co/index.php/Re_Mo/article/view/3020
- Calle Lazo, A. K. (2020). *"Propuesta de integracion del analisis de vibraciones al plan de mantenimiento, predictivo de rodillos de las prensas 1 y 2 en el molino de cartopel S.A.I."*. Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19597>
- Canto Solís, A. (2018). *"Análisis de la velocidad angular instantanea en máquinas rotatorias como técnicas de monitoreo de condición. Aplicación en transmisión planetaria y molinos de bolas"*. Concepción - Chile.
- Cárcel, F. J. (2016). "Disponibilidad, incertidumbre y cadena de fallo en mantenimiento". Obtenido de <https://www.3ciencias.com/articulos/articulo/disponibilidad-incertidumbre-cadena-fallo-mantenimiento/>
- Carrazana, Morales, & Cardón, L. (2007). DaMA-WEB: UN PROGRAMA PARA EL MONITOREO Y CONTROL LOCAL Y REMOTO VIA. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/93251>
- Castro Acevedo, Y. A. (2022). *Mantenimiento Predictivo*. Copiapo. Obtenido de <https://repositorioacademico.uda.cl/bitstream/handle/20.500.12740/16322/bib%2029277.pdf?sequence=1>
- Chávez Cadena, M. I., Jiménez, C. J., & Cucuri Pushug, M. I. (2020). "Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) del sistema de reinyección de

- agua de formación". Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7437976>
- Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2014). *"Sensores y actuadores"*. Obtenido de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=wMm3BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=sensores+concepto&ots=6Oajfw913t&sig=oOjOJZR0f9f_z4edQtWVOUpqQsl#v=onepage&q=sensores%20concepto&f=false
- Costta, G. G., & Guevara, J. G. (2015). Elaboración de un plan de mejora para el mantenimiento preventivo en los sistemas de aire acondicionado de la red de telefónica del Perú zonal norte, basado en la metodología Ishikawa - Pareto. Obtenido de <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/1203>
- Defas, R., & Guzmán, A. (2017). Implementación de un sistema de monitoreo y control de actuadores eléctricos AUMA utilizando protocolos de comunicación industrial Modbus RTU y Modbus TCP/IP. Obtenido de <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/anales/article/view/1592/1527>
- Delgado, P. J. (2019). *Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la unidad minera Uchucchacua*. Obtenido de https://repositorio.utec.edu.pe/bitstream/20.500.12815/242/1/Delgado%20Pomachagua_Tesis.pdf
- Delgado, P., & Pablo, J. (2019). *"Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la Unidad Minera Uchucchacua"*. Lima – Perú. Obtenido de https://repositorio.utec.edu.pe/bitstream/20.500.12815/242/1/Delgado%20Pomachagua_Tesis.pdf
- Delnevo, G., Roccetti, M., & Mirri, S. (2020). ¿Máquinas inteligentes y buenas? El papel de la codificación de dominio y contexto. *Aplicaciones y redes móviles*. 25(3), 977-985. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11036-019-01233-7>

- Emerson, P. M. (2016). Analizador CSI 2140 Machinery Health. Obtenido de <https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-gu%EDa-de-inicio-r%E1pido-ams-es-39740.pdf>
- Flores, M., Medina, D., Vargas, D., & Remache, B. (2020). Asignación de modelos de mantenimiento basada en la criticidad y disponibilidad del equipo. 9(4), 27-34. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7746457>
- Garcia, O. (1998). La esencia del mantenimiento productivo total. Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1298>
- Gavidia, J., & Rodriguez, R. (2020). *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*. Trujillo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/51061>
- Guillen, M., & Anibal, W. (2019). *Diseño e implementación de un sistema protección, control y monitoreo del sistema de lubricación del Molino de Bolas Hardinge 14'x24' en planta concentradora de Cía. Minera Casapalca*. Puno. Obtenido de <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3280033?show=full>
- Guzman Restrepo, J. (2023). *Diseño de Guía para la adquisición de tecnología para el monitoreo de condición por vibraciones y temperatura para una PYME en el contexto de la 4ta revolución industrial y el mantenimiento predictivo*. Medellín, Colombia. Obtenido de <http://siawebpr.itm.edu.co/handle/20.500.12622/6006>
- Hernandez Cotrina, J. M., & Serrano Bringas, J. A. (2022). *Mantenimiento preventivo para incrementar la disponibilidad de maquinaria en el Molino Galan EIRL, Guadalupe, 2021*. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/54353/Hernandez_CJM-Serrano_BJA-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Hernandez Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Diseños experimentales de investigación, experimentos "verdaderos" y cuasiexperimentos*. Mexico. Obtenido

de

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64591365/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n._Rutas_cuantitativa__cualitativa_y_mixta-libre.pdf?1601784484=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMETODOLOGIA_DE_LA_INVESTIGACION_LAS_RUTA.pdf&Expires=

HERNANDEZ, R., & MENDOZA, C. (2018). *Metodología de la investigación, las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mexico. Obtenido de http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abu_so/Articulos/SampieriLasRutas.pdf

INEI, I. N. (2021). Informe Técnico de Producción Nacional. Obtenido de <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/03-informe-tecnico-produccion-nacional-ene-2021.pdf>

Infraspeak, T. (2022). Estadísticas de Mantenimiento: Desafíos, Tendencias y Métricas. doi:<https://blog.infraspeak.com/es/mantenimiento-estadisticas-desafios-tendencias/>

Inga, J. (2021). *“Mejora de la disponibilidad mecánica del molino de bolas 9x13 ft para incrementar la producción diaria en minera sierra antapite*. Huancayo. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7309/T010_46124069_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Larrea, A. D., Redrobán, C. D., & Castillo Medina, A. G. (2020). Priorización del mantenimiento mediante la determinación del número prioritario de riesgo, y el análisis de modos y efectos de fallos de una máquina de inyección de poliuretano de alta presión. Obtenido de <https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/1353>

- Leyva Alcazaba, J. D. (2020). *"Propuesta de mejora del Mantenimiento predictivo por Analisis vibracional para aumentar la Disponibilidad de los equipos criticos del area de lavaderos de una empresa Azucarera"*. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/61084>
- Lopez, M. (2022). *Administración para ingenieros. Ecoe Ediciones*. Bogota-Colombia. doi:<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=kWBaEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=En+este+s#v=onepage&q=En%20este%20s&f=false>
- Luque Sevincha, P. L. (2023). *"Monitoreo de Condicion y analisis de fallas, mediante tecnicas predictivas analisis vibracional, termografía y ultrasonido acustico al molino vertical certimill"*. Obtenido de file:///C:/Users/ADMIN/Downloads/MTIusepl.pdf
- Magnathte, Z., & Oscar, G. (2019). *"Implementación del Sistema de Reducción de Ruido mediante Automatización Mecánica del Molino Polvador N°1 en el Área de preparación mecánica de muestras en Planta Belén, Chala – Arequipa. 2018"*. Arequipa. Obtenido de https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/2061/Oscar%20Magnathte_Tesis_Titulo%20Profesional_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Maigua, C., Quitiaquez, W., Simbaña, I., Quitiaquez, P., Toapanta, F., & Isaza, C. (2020). *Diseño de un Sistema de Monitoreo de Vibraciones Mecánicas en Generadores Hidroeléctricos de Media Potencia*. 17(1), 92-102. Obtenido de <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/397>
- Mesa, D., Ortíz, Y., & Pinzón, m. (2006). *Confiabilidad, la Disponibilidad y la Mantenibilidad. Disciplinas*. Obtenido de file:///C:/Users/USUARIO%203/Downloads/Dialnet-LaConfiabilidadLaDisponibilidadYLaMantenibilidadDi-4830901%20(2).pdf
- Mohanty, S., Gupta, K. K., & Solomon, R. K. (2015). *Extracción y análisis de características de vibración de un molino de bolas industrial. Sensor acelerómetro MEMS y técnica de análisis de datos sincronizados. Procedia Computer Science, 58, 217-224*. doi:<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

- Mora, A. (2009). *Planeamiento, ejecución y control*. Obtenido de <https://elvisjgblog.files.wordpress.com/2019/11/mantenimiento-planeamic3b3n-ejecucic3b3n-y-control-alberto-mora-gutic3a9rrez.pdf>
- Moubray, J. (2004). MANTENIMIENTO CENTRADO EN. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/35711506/MANTENIMIENTO_CENTRADO_EN-libre.pdf?1416860672=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMANTENIMIENTO_CENTRADO_EN_LA_C ONFIABILID.pdf&Expires=1690219517&Signature=B2kF1Pb~yDeiU~bqEyASyY5 ECf~ypoaTNKmU
- Ngandu, K. G., Chimentin, X., & Rasolofondraibe, L. (2022). Modelado de los efectos de las fuerzas impulsivas de un molino de bolas sobre el comportamiento dinámico de una caja de engranajes de una sola etapa. *Maquinas*, 10(4). doi:<https://doi.org/10.3390/machines10040226>
- ÑAUPAS, H., MEJIA, E., NOVOA, E., & ViLLAGOMEZ, A. (2014). *Metodología de la investigación Cuantitativa-Cualitativa y redacción de tesis*. Bogotá- Colombia. Obtenido de <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/B0028.pdf>
- Orellana Daube, D. (2020). El efecto global de la actual revolución tecnológica 4ª revolución industrial y la industria 4.0 en acción. *Revista GEON (Gestión, Organizaciones Y Negocios)*. 7(2), 1-24. Obtenido de <https://revistageon.unillanos.edu.co/index.php/geon/article/view/194>
- Palomino Marín, E. (2007). "*Elementos de medición y Análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*". Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55592347/46228543-Elementos-de-medicion-y-analisis-de-vibraciones-mecanica-en-maquinas-rotatorias-libre.pdf?1516500251=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DElementos_de_Medicion_y_Analisis_de_Vibr .pdf&Ex

- Pantaleo, G., & Rinaudo, L. (2015). *Ingeniería de Software*. Obtenido de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=rjxyEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=SOFTWARE+que+es%3F&ots=5kouqUbG-N&sig=FRsEy0Z6JwPTSCkKd0kk4bN9BA4#v=onepage&q=SOFTWARE%20que%20es%3F&f=false>
- Paucar Moya, H. H. (2022). *Estudio de Ruido Laboral y Vibraciones en el area de molinos y pastificio de la Empresa Industrias Catedral S.A.*. Ambato, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/36339>
- Peña, W., Rodríguez, L., Ramírez, J., & García, P. (2018). Monitoreo, control y diagnóstico en bancos de capacitores automáticos en baja tensión. 26(1). Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052018000100028&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- Prabhaker, M., Chandra M, P., Uttam, S., Anshul, G., Chinmoy, S., & Amit, K. (Enero de 2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*. doi:10.4103/aca.ACA_157_18
- PTSAC, P. T. (2023). AMS 2140 Analizador de mantenimiento de maquinaria. Obtenido de <https://www.predictivototal.com.pe/wp-content/uploads/DATA-SHEET-CSI2140.pdf>
- Reyes, L. G., Artega Linzan, Á. R., & Rodríguez, P. A. (2021). Determinación de Indicadores de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad, Caso de Estudio: Industria de Elaboración de Conservas de Atún. Obtenido de <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/download/774/480>
- rodesprex. (s.f.). *Norma ISO 10816*. Obtenido de <https://rodesprex.com/assets/img/services/servbenf04.pdf>
- Rosado Alvarado, E. S. (2022). *"Mantenimiento predictivo por metodo Shock pulse para aumentar la disponibilidad de equipos rotativos en una planta de harina de pescado"*. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/92359>

- Salamanca, J. M., Fernández Avendaño, E., Albarracín, M. E., & Gutiérrez, G. (2014). *Sensado inalámbrico de gases en minería con servicio web en tiempo real*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096185>
- Salazar Castro, J. A. (2023). *"Desarrollo de un modelo de mantenimiento predictivo en una planta de molienda SAG basada en redes Bayesianas y Deep Learning"*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/194109>
- Sales, M. (2013). Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44144377/Diagramde_pareto-libre.pdf?1459094480=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDiagrama_de_Pareto.pdf&Expires=1690220572&Signature=BlumS0ZNMEiPGzM-7cfissqXtuTwiPbZvkMtfuj9ZR0VzTeeAoqsYWYbm28wxjQXtyr
- Sexto, L. (2017). *Tipos de mantenimiento: ¿Cuántos y cuáles son?* Obtenido de http://www.mantenimientomundial.com/notas/SEXTO_Tipos-Mantenimiento.pdf
- Valenzuela, J. (2013). *Los molinos de barras son generalmente usados cuando se espera que el producto de la molienda sea grueso y no contenga lama*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6069/1/CD-4796.pdf>
- White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Obtenido de <https://termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf>
- Zamora, I. (2018). *"Diseño De Un Plan De Mantenimiento Para Un Molino De Bolas De La Empresa Compañía Minera Cerro Negro S.A."*. Quilpue- Chile. Obtenido de http://opac.pucv.cl/pucv_txt/Txt-9500/UCC9690_01.pdf

ANEXOS

Anexo 1

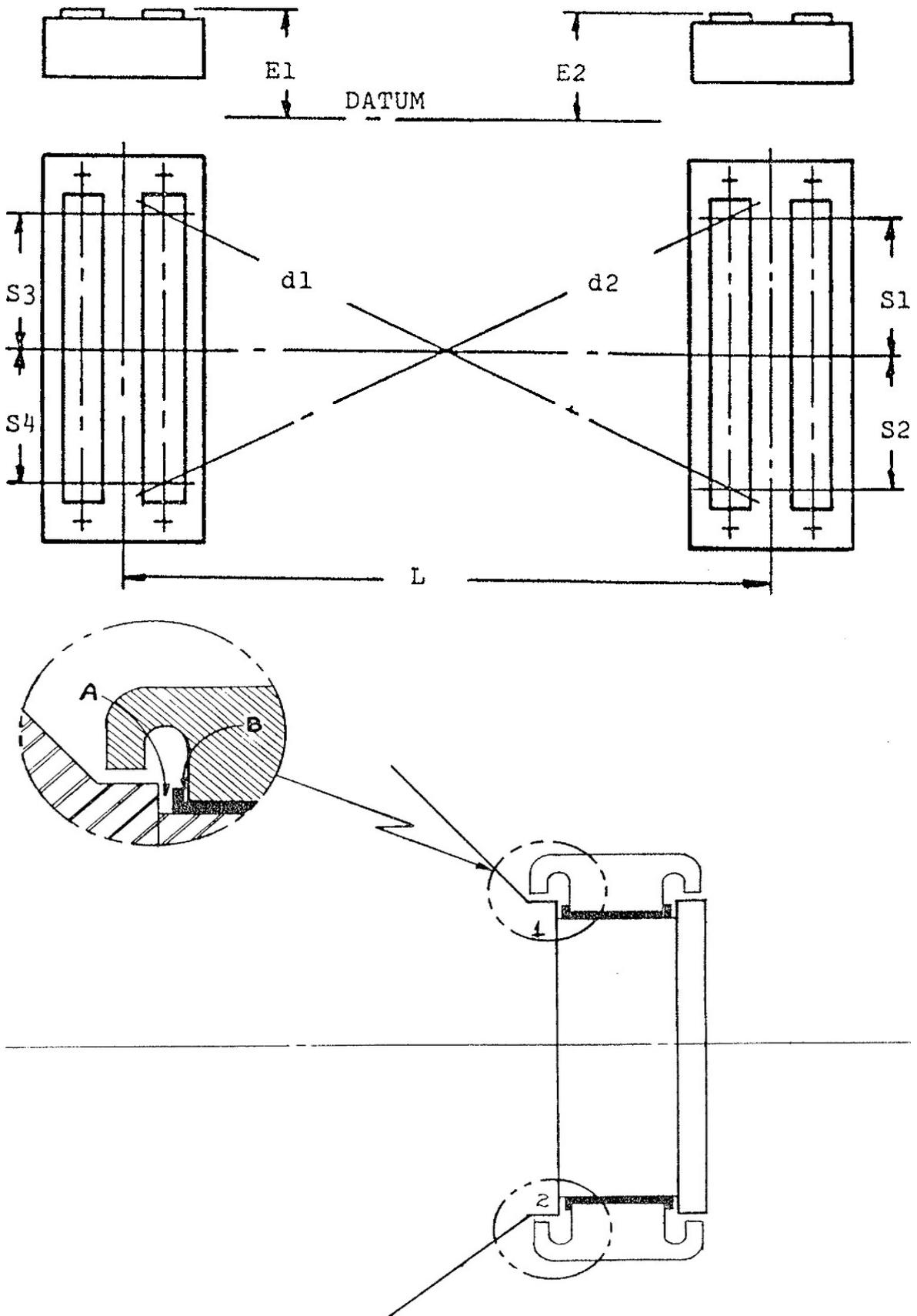
Propuesta de un sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional para mejorar la disponibilidad del molino de bolas koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.

Matriz: problema, objetivos, hipótesis y variables generales:

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables
¿De qué manera se mejora la disponibilidad del molino de bolas koppers 16,5 x 23 en la compañía minera SMEB?	Proponer un sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional para mejorar la disponibilidad del molino de bolas Koppers 16.5 x 23 en la compañía minera SMEB.	La propuesta del sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional influye en la mejora de la disponibilidad del molino de bolas koppers 16.5 x 23 en una compañía minera.	VI: Sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional. VD: Mejora de la disponibilidad del molino de bolas koppers 16.5 x 23.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables
a) ¿De qué manera se determina la disponibilidad actual del molino de bolas Kooper 16,5x23 en la compañía minera SMEB?	a) Analizar los indicadores (MTBF) y (MTTR) actual para determinar la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16.5x23 en la compañía minera SMEB.	a) El análisis acerca de los indicadores (MTBF) y (MTTR) actual, permite determinar la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16.5x23 en una compañía minera.	VI: Situación actual de los indicadores (MTBF) y (MTTR). VD: Disponibilidad actual del molino de bolas koppers 16.5 x 23.
b) ¿De qué manera se identifica las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16,5 x 23 en la compañía minera SMEB?	b) Analizar los modos y efectos de falla (AMEF) para determinar las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16,5x23 en la compañía minera SMEB.	b) El análisis de modos y efecto de fallas (AMEF) permite determinar las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16,5x23 en la compañía minera SMEB.	VI: Análisis de modo y efecto de fallas (AMEF) VD: Identificación de las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16,5x23.

<p>c) ¿De qué manera se disminuye las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16,5 x23 en la compañía minera SMEB?</p>	<p>c) Proponer el sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional para disminuir las fallas funcionales del molino de bolas koppers 16.5 x 23 en la compañía minera SMEB.</p>	<p>c) La propuesta del sistema de sensado y monitoreo online basado en análisis vibracional permite disminuir las fallas funcionales del molino de bolas koppers 16.5 x 23 en la compañía minera SMEB.</p>	<p>VI: Sistema de sensado basado en el análisis vibracional VD: Disminución de las fallas funcionales del molino de bolas Kooper 16,5x23.</p>
<p>d) ¿Cómo influye la propuesta en la disponibilidad del molino de bolas Kooper 16,5 x 23 en la compañía minera SMEB?</p>	<p>d) Determinar los indicadores (MTBF) y (MTTR) después de la propuesta para comparar la disponibilidad del molino de bolas koppers 16.5 x 23 en la compañía minera SMEB.</p>	<p>d) Al comparar los indicadores (MTBF) y (MTTR), antes y después de la propuesta permite evaluar la mejora de la Disponibilidad del molino de bolas Kooper 16,25x23 en la compañía minera SMEB.</p>	<p>VI: Tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio para reparar (MTTR). VD: Evaluar la mejoría de la Disponibilidad del molino de bolas koppers 16.5 x 23.</p>

Anexo 2: Molino de bolas Kooper 16.5 x23



Anexo 3: Cartas ilustradas de diagnóstico de Vibración



TABLA I - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACION

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
Desbalanceo A. Desbalanceo Estático	1X RADIAL		El Desbalanceo Estático estará en fase y estable. La amplitud debido al desbalance aumentara por el cuadrado de la velocidad incrementada estando por debajo de la primera crítica del rotor (un incremento de velocidad de 3X = una vibración a 9X mayor). 1XRPM siempre estará presente y por lo general domina el espectro. Puede ser corregido colocando un solo peso de corrección de balance en un plano en el Centro de Gravedad del Rotor (CG). Una diferencia de fase aproximadamente de 0° debe existir entre los Horizontales OB&B, así como entre las Verticales OB&B. Usualmente también ocurre una diferencia de fase aproximadamente de 90° entre las lecturas de fase Horizontal y Vertical en cada rodamiento del rotor desbalanceado (±30°).
B. Desbalanceo de Par de Fuerzas	1X RADIAL		Un Desbalanceo de Par de Fuerzas resulta en un desfase de 180° del movimiento en el mismo eje. 1XRPM siempre esta presente y normalmente domina el espectro. La amplitud varia por el cuadrado de la velocidad incrementada por debajo de la primera velocidad crítica del rotor. Puede causar una alta vibración axial así como radial. La corrección requiere la colocación de los pesos de balanceo en almenos 2 planos. Note que debe existir una diferencia aproximada de 180° entre las Horizontales OB&B así como entre las Verticales OB&B. También usualmente ocurre una diferencia aproximada de 90° entre las lecturas Horizontal y vertical en cada rodamiento (±30°).
C. Desbalanceo Dinámico	1X RADIAL		El Desbalanceo Dinámico es el tipo de desbalanceo que se consigue mas comúnmente y es una combinación de Desbalanceo estático y de par de fuerzas. 1XRPM domina el espectro y realmente necesita una corrección en 2 planos. Aquí la diferencia de fase Radial entre los rodamientos externos e internos puede estar en cualquier lugar del rango entre 0° y 180°. Sin embargo, la diferencia de fase Horizontal debe de cuadrar usualmente con la diferencia de fase Vertical, cuando se comparan las mediciones de los rodamientos externos e internos (±30°). Si el desbalanceo predomina una diferencia de fase de 90° resulta entre las lecturas Horizontal y Vertical de cada rodamiento (±40°).
D. Desbalanceo de Rotor en Voladizo	1X AXIAL & RADIAL		El Desbalanceo de Rotor en Voladizo causa un alto 1XRPM en las direcciones Axial y Radial. Las lecturas Axiales tienden a estar en fase mientras que las lecturas de fase Radial pueden estar inestables. Sin embargo, las diferencias de fase Horizontal usualmente cuadran con las diferencias de fase Vertical en el rotor desbalanceado (±30°). Los Rotores en Voladizo tienen desbalances Estáticos y de Par de Fuerzas, cada uno de los cuales requiere una corrección. Así, los pesos de corrección casi siempre tendrán que ser colocados en dos planos para contrarrestar ambos desbalances, el estático y el de par de fuerzas.
Rotor Excéntrico	1X FAN 1X MOTOR RADIAL		La excentricidad ocurre cuando el centro de rotación esta fuera de la línea de centro geométrico de una polea, engranaje, rodamiento, armadura del motor, etc. La vibración mayor ocurre a 1XRPM del componente excéntrico en una dirección a través de la línea que une el centro de ambos rotores. Comparativamente, las lecturas de fase Horizontales y verticales usualmente difieren 0° ó 180° (cada una de las cuales indica el movimiento en línea recta). El intentar balancear un rotor excéntrico resulta en reducir la vibración en un dirección radial pero incrementaría en la otra (dependiendo de la cantidad de excentricidad).
Eje Doblado	1X AXIAL 2X		Los problemas de Eje Doblado causan una alta vibración axial con un diferencia de fase axial tendiendo a 180° en el mismo componente de la máquina. La vibración dominante ocurre normalmente a 1X si esta doblado cerca del centro del eje, pero ocurre a 2X si esta doblado cerca del acople. (ser cuidadoso al tomar en cuenta la orientación del transmisor para cada medición axial si usted voltea la dirección de la probeta). Use un indicador de dial para confirmar el doblado de eje.
Desalineación A. Desalineación Angular	1X 2X 3X AXIAL		La Desalineación Angular se caracteriza por una alta vibración axial, 180° fuera de fase a través del acople típicamente tendrá una vibración axial en 1XRPM y 2XRPM. Sin embargo no es inusual que tanto 1X, 2X ó 3X domine. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acople. Una severa desalineación angular puede excitar muchas armónicas de 1XRPM. A diferencia de la soldura mecánica de tipo C, estas múltiples armónicas no tienen típicamente un incremento de ruido en el piso del espectro.
B. Desalineación Paralela	1X 2X 3X RADIAL		La desalineación paralela posee síntomas de vibración similares a la angular pero muestra una alta vibración radial que se aproxima a 180° fuera de fase a través del acople. 2X es por lo regular mayor que 1X, pero su altura respecto a 1X es por lo general debida a el tipo de acople y construcción de este. Cuando cualquier desalineación, Angular o Radial, se vuelve severa, puede generar tanto picos de gran amplitud a altas armónicas (4X-8X) como también toda una serie de armónicas de alta frecuencia, similares en apariencia a la soldura mecánica. El tipo de acople y el material influyen de gran manera a todo el espectro cuando la desalineación es severa. No presenta por lo general un incremento de ruido en el piso.
C. Desalineación de Rodamiento Inclinado Sobre el Eje	1X 2X 3X AXIAL FASE 1 2:00 2 6:00 3 8:00 4 11:00		Un rodamiento inclinado genera una vibración Axial considerable. Puede causar un movimiento torsional con un cambio de fase aproximado de 180° de arriba a abajo y/o de lado a lado cuando se mide en dirección Axial de la misma carcasa del rodamiento. Intentos de alinear el acople o balancear el rotor no aliviara el problema. Es necesario remover el cojinete e instalarlo correctamente.

TABLA I - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACION

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
<p>Resonancia</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> </div> <div style="width: 60%;"> </div> </div> <p>La resonancia ocurre cuando una frecuencia forzada coincide con una frecuencia natural del sistema, y puede causar una amplificación dramática de las amplitudes, lo que puede resultar en una falla prematura o incluso catastrófica. Esta puede ser una frecuencia natural del rotor, pero a menudo puede ser originada por el bastidor, la cimentación, caja de engranajes e incluso las correas de transmisión. Si un rotor está o se aproxima a la resonancia puede ser prácticamente imposible balancearlo debido a el enorme cambio de fase que experimenta (90° en resonancia, cerca de 180° cuando la atraviesa). A menudo requiere el cambio de la frecuencia natural a una frecuencia mayor o menor. Generalmente las frecuencias naturales no cambian con un cambio en la velocidad, lo que ayuda a su identificación (exceptuando una máquina con cojinetes de gran tamaño o un rotor que tenga un voladizo significativo).</p>			
<p>Soltura Mecánica</p>	<p style="text-align: center;">TIPO A</p> <p style="text-align: center;">TIPO B</p> <p style="text-align: center;">TIPO C</p>		<p>La soltura mecánica esta indicada para un espectro de vibración de tipo A, B o C.</p> <p>Tipo A es causada por soltura/debilitamiento estructural del pie de la máquina, la placa base o cimentación, también por una sedimentación deteriorada, soltura de los pernos que sujetan a la base y distorsión del bastidor o base (Ej. pata floja). El análisis de fase puede revelar una diferencia de 90° a 180° entre la medición Vertical de los pernos, pie de máquina, placa base o la base misma.</p> <p>Tipo B es generalmente causada por soltura de los pernos de la bancada, fisuras en la estructura del bastidor o en el pedestal del cojinete.</p> <p>Tipo C es normalmente generada por un ajuste inadecuado entre las partes componentes, que puede causar numerosas armónicas debidas a respuestas no lineales de partes flojas a fuerzas dinámicas del rotor. Causa un truncamiento de la Onda de Tiempo y un ruido elevado en el suelo del espectro. La tipo C es causada con frecuencia por el aflojamiento de un cojinete en su caja, por un espacio excesivo en la camisa o los elementos rodantes del rodamiento, un impulsor o eje flojo, etc. La fase tipo C es con frecuencia inestable y puede variar ampliamente de un arranque al siguiente. La soltura mecánica es a menudo altamente direccional y puede causar lecturas notablemente diferentes si se comparan niveles en incrementos de 30° en dirección radial alrededor de la carcasa del rodamiento. También nótese que la soltura podrá causar múltiples subarmónicas exactamente a 1/2 o 1/3X RPM (0.5X, 1.5X, 2.5X, etc.).</p>
<p>Roce (Fricción) del Rotor</p>	<p style="text-align: center;">RADIAL</p>		<p>El Roce del Rotor produce un espectro similar al de la soltura mecánica cuando las partes giratorias entran en contacto con los componentes fijos. La fricción puede ser parcial o en toda la revolución del rotor. Usualmente genera una serie de frecuencias, lo que por lo general excita una o mas resonancias. A menudo existen subarmónicas de fracción íntegra, de la velocidad de fraccionamiento (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, ..., 1/n). Dependiendo de la ubicación de las frecuencias naturales del rotor. La fricción del rotor puede excitar numerosas frecuencias altas (similar al ruido de banda ancha que se produce al pasar una tiza por un pizarrón) puede ser muy grave y de corta duración si es causado por el eje haciendo contacto con el Babbit del cojinete. Una fricción anular total alrededor de toda la revolución del eje puede inducir una "precesión reversa" con el rotor girando rápidamente a la velocidad crítica en dirección opuesta a la rotación del eje (Inherentemente inestable que puede llevar a una falla catastrófica).</p>
<p>Cojinetes A. Problemas por Desgaste o Juego.</p>	<p style="text-align: center;">RADIAL</p>		<p>Etapas posteriores del desgaste de cojinete son normalmente puestas en evidencia debido a la presencia de series completas de armónicas de velocidad de funcionamiento (hasta 10 o 20). Cojinetes gastados a menudo permiten altas amplitudes Verticales en comparación con las Horizontales, pero solo mostraran un pico pronunciado a 1XRPM. Los cojinetes con soltura (Juego) excesivo pueden permitir que un desbalance y/o desalineación menor cause una alta vibración que sería mucho menor si el juego del cojinete se ajustara a las especificaciones.</p>
<p>B. Inestabilidad por Remolino de Aceite</p>	<p>(.40 - .48 X RPM)</p>		<p>La inestabilidad por Remolino de Aceite ocurre a 40-48XRPM y a menudo es bastante grave. Se le considera excesiva cuando la amplitud excede el 40% de la holgura del cojinete. El remolino de aceite es una vibración de la película de aceite donde las desviaciones en las condiciones normales de operación (ángulo de disposición y radio de excentricidad) causa que una cuña de aceite "empuje" al eje dentro del cojinete. La fuerza desestabilizadora en dirección de la rotación resulta en un remolino (precesión hacia adelante). El remolino de aceite es inestable ya que incrementa las fuerzas centrífugas que aumentan las fuerzas del remolino. Puede causar que el aceite no soporte al eje, o puede convertirse en inestable cuando la frecuencia del remolino coincide con una frecuencia natural del rotor. Cambios en la viscosidad del aceite, presión de lubricación y cargas previas externas pueden afectar al remolino de aceite.</p>
<p>C. Inestabilidad por Latigazo de Aceite</p>			<p>El Latigazo de Aceite puede ocurrir si la máquina opera a o sobre 2X la frecuencia crítica del rotor. Cuando el motor alcanza dos veces la velocidad crítica, el remolino estará muy cercano a la crítica del rotor y podrá causar una vibración excesiva que la película de aceite no sea capaz de soportar. La velocidad del remolino se "congela" a la crítica del rotor. No rebasara este pico aun cuando se eleve mas y mas la velocidad. Produce una vibración subarmónica lateral adelantada precesional a la frecuencia crítica del rotor. Inherentemente inestable que puede llevar a una falla catastrófica.</p>

TABLA I - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN

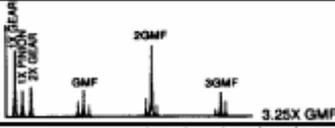
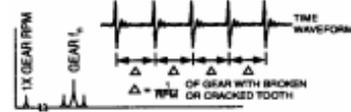
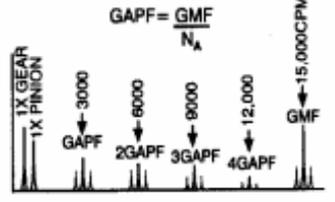
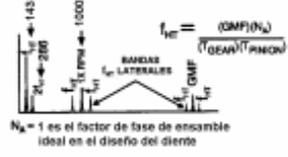
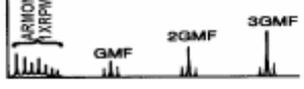
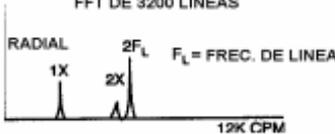
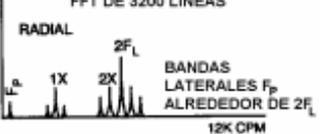
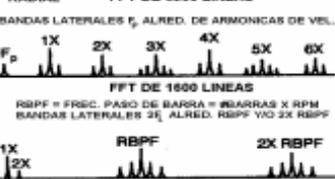
<p>E. Desalineación del Engranaje</p>		<p>La Desalineación del Engranaje casi siempre excita la armónica de GMF de segundo orden o una mayor, que tendrá bandas laterales a la velocidad de funcionamiento. A menudo mostrará solo una pequeña amplitud 1XGMF, pero niveles más altos a 2X 3XGMF. Es importante colocar F_{LIM} suficientemente alta para captar al menos 3 armónicas GMF. También bandas laterales alrededor de 2XGMF estarán espaciadas a 2XRPM. Nótese que las amplitudes de banda lateral a menudo no son iguales a la derecha e izquierda del GMF y armónicas de GMF debido a la desalineación del diente.</p>
<p>F. Diente Agrietado/Roto</p>		<p>Un Diente Agrietado o Roto podrá generar una gran amplitud a 1XRPM de este engranaje <u>solo en la Onda de Tiempo</u> además excitará la frecuencia natural del engranaje (f_n) con bandas laterales a su velocidad de giro. Se detecta mejor en Onda de Tiempo ya que mostrará un pico pronunciado cada vez que el diente problemático trate de engranar con los dientes del engranaje compañero. El tiempo entre los impactos (Δ) corresponde a 1XRPM del engranaje con el problema. Las amplitudes de Picos de Impacto en la Onda de Tiempo será de 10 a 20 veces más grandes que 1XRPM en el FFT.</p>
<p>G. Problemas de Fase de Ensamble de Engranajes</p>		<p>La Frecuencia de Fase de Ensamble de Engranaje (GAPF) puede resultar en Frecuencias de Engrane Fraccionales (si $N_p > 1$). Eso realmente significa que (T_p/N_p) dientes del engranaje harán contacto con (T_g/N_g) dientes del piñón y generaran N_a patrones de desgaste, donde N_a es una combinación de dientes dada igual al producto de los factores primos comunes al número de dientes en el engranaje y el piñón ($N_a = \text{Factor de Fase de Ensamble}$). GAPF (o armónicas) pueden mostrarse desde el comienzo si hubieran problemas de manufactura. También su respectiva aparición en un espectro de recorrido periódico puede indicar daños si partículas contaminantes pasaron a través del engrane, resultando en daño al diente en engrane en el momento de la ingestión, justo cuando entra y deja el engrane.</p>
<p>H. Problemas de Caza de Diente de Diente</p>		<p>La Frecuencia de Caza de Diente (f_{TDF}) ocurre cuando están presentes fallas tanto en el engranaje como en el piñón que pueden haber ocurrido durante el proceso de manufactura, debido a malos tratos, o en el campo. Puede causar una vibración apreciable, pero como ocurre a bajas frecuencias predominantemente menores a 600CPM es por lo general pasada por alto. Un juego de engranajes con este problema de diente repetitivo normalmente emite un sonido de gruñido en la transmisión. El efecto máximo ocurre cuando los dientes defectuosos del piñón y el engranaje entran en engrane al mismo tiempo (en algunas transmisiones esto puede ocurrir solo 1 de cada 10 a 20 revoluciones, dependiendo de la fórmula de f_{TDF}). Nótese que $T_{PIÑON}$ y $T_{ENGRANE}$ se refieren a los números de dientes en el engranaje y piñón respectivamente. N_a es el Factor de Fase de Ensamble definido arriba. Generalmente modula los picos GMF y RPM del engranaje.</p>
<p>FUENTE DEL PROBLEMA</p>	<p>ESPECTRO TÍPICO</p>	<p>OBSERVACIONES</p>
<p>I. Soltura del Rodamiento</p>		<p>Una holgura excesiva de los rodamientos que soportan los engranajes puede no solo excitar muchas armónicas de la velocidad de giro, si no también puede causar respuestas de gran amplitud en GMF, 2GMF y/o 3GMF. Estas altas amplitudes de GMF son actualmente respuestas a, y no la causa de, soltura de los rodamientos que soportan a los engranajes. Esta soltura excesiva puede ser causada por desgaste excesivo del rodamiento o por un montaje inadecuado del mismo durante la instalación. Si se deja sin corregir, puede causar un desgaste excesivo del engranaje y daño a otros componentes.</p>
<p>Motores de Inducción AC</p> <p>A. Excentricidad del estator, Laminaciones en Corto o Hierro Flojo</p>		<p>Los problemas del estator generan alta vibración a 2X frecuencia de línea ($2F_L$). La excentricidad del estator produce un entrehierro fijo irregular entre el rotor y el estator que produce una vibración muy direccional. El entrehierro diferencial no debe exceder el 5% en los motores de inducción y 10% en los motores sincrónicos. Una pata floja y bases dobladas pueden producir un estator excéntrico. Un hierro flojo es debido al debilitamiento o alojamiento del soporte del estator. Los cortos circuitos en las laminas del estator pueden causar un calentamiento irregular localizado, que puede deformar al mismo estator. Esto produce vibración térmicamente inducida que puede crecer significativamente con el tiempo de operación causando deformación del estator y problemas del entrehierro.</p>
<p>B. Rotor Excéntrico (Entrehierro Variable)</p> <p>F_L = Frec. de Línea Eléctrica N_p = Veloc. de Sinc. = $120 F_L$ P F_B = Frec. de Desliz. = N_p - RPM F_P = Frec. Paso de Polo = $F_B \times P$ P = # de Polos</p>		<p>Los Rotores Excéntricos producen un entrehierro de rotación variable entre el rotor y el estator, lo que induce una vibración pulsante (normalmente entre $2F_L$ y la armónica de velocidad de giro más cercana). A menudo requiere de un "zoom" del espectro para separar $2F_L$ y la armónica de la velocidad de giro. Los rotores excéntricos generan una $2F_L$ rodeada de bandas laterales de frecuencia de Paso de Polo (F_P), así como bandas laterales F_P alrededor de la velocidad de giro. F_P aparece por sí sola a baja frecuencia (Frecuencia de paso de Polo = Frecuencia de Deslizamiento X #Polos), los valores comunes del rango F_P va de 20 a 120 CPM (0.3 - 2.0 Hz). Una pata floja o una desalineación a menudo inducen un entrehierro variable debido a la distorsión (realmente un problema mecánico, no eléctrico).</p>
<p>C. Problemas del Rotor</p> 		<p>Unas Barras del rotor rotas o agrietadas o anillos en corto; juntas malas entre las barras del rotor y los anillos en corto o laminaciones del rotor en corto pueden producir una vibración a velocidad de giro 1X con bandas laterales a la frecuencia de paso de polo (F_P). Además estos problemas generaran a menudo bandas laterales de paso de polo F_P alrededor de las segunda, tercera, cuarta y quinta armónica de la velocidad de giro. Barras del rotor flojas o abiertas con son indicadas por bandas laterales a 2X la frecuencia de línea ($2F_L$) rodeando a la Frecuencia de Paso de Barra del Rotor (RBPF) y sus armónicas (RBPF = Número de barras X RPM). A menudo causaran altos niveles a 2XRBPFF con solo una pequeña amplitud a 1XRBPFF. Un arqueamiento inducido eléctricamente entre las barras flojas del rotor y los anillos a menudo mostrarán altos niveles a 2XRBPFF (con bandas laterales a $2F_L$); pero muy poco o casi nada en el espectro de velocidad de giro.</p>

TABLA I - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN

D. Problemas de Fase (Conector Flojo)		<p>Los problemas de Fase debidos a conectores flojos o rotos pueden causar una excesiva vibración a 2X la frecuencia de línea (2F_L) que tendrá unas bandas laterales alrededor espaciadas a 1/3 de la frecuencia de línea (1/3 F_L). Los niveles a 2F_L pueden exceder 1.0 in/seg sino se corrige. Este es particularmente un problema si el conector defectuoso solo hace contacto esporádicamente. Los conectores flojos o rotos deben ser reparados para prevenir una falla catastrófica.</p>
Motores AC Sincrónicos (Espiras del Estator Flojas)		<p>Las Espiras del Estator flojas en un motor sincrónico generaran alta vibración a la frecuencia de paso de espira (CPF) que es igual al número de espiras del estator X RPM (#Espiras del Estator = #Polos X #Espiras/Polos). La Frecuencia de Paso de Espira estará rodeada por bandas laterales a 1XRPM. Los problemas de motor sincrónico también serán indicados por altos picos de amplitud a aprox. 60,000 a 90,000 CPM, acompañados de bandas laterales a 2F_L. Tomar al menos un espectro a 90,000 CPM en cada carcasa de rodamiento del motor.</p>
Motores y Controladores DC A. Espectro Normal		<p>Numerosos problemas de Motores y Controladores DC pueden ser detectados por análisis de vibración. Los Motores con Circuito Rectificado a Onda Completa (6SCR) generan una señal a 6X la frecuencia de línea (6F_L = 360 Hz = 21,600 CPM); mientras que los Motores con Circuito Rectificado a Onda Media (3SCR) la generan a 3X la frecuencia de línea (3F_L = 180 Hz = 10,800 CPM). La Frecuencia de Disparo SCR está presente normalmente en el Espectro de Motor DC, pero a baja amplitud. Nótese la ausencia de otros picos múltiplos de F_L.</p>
B. Arrollado de Armadura Roto, Problemas de Aterramiento o Falta de Entonación del Sistema		<p>Cuando los espectros de Motor DC están dominados por altos niveles a SCR 2XSCR normalmente indica tanto un Arrollado de Armadura Roto como Falta de Entonación (Tuning) del Sistema. Solo una entonación apropiada podrá disminuir las vibraciones en SCR y 2XSCR significativamente, si el problema de control es predominante. Altas amplitudes a estas frecuencias normalmente se encontraran sobre .10 in/seg a 1XSCR y .04 in/seg a 2XSCR de Frec. de disparo.</p>
C. Tarjeta de Disparo Defectuosa o Fusible Quemado		<p>Cuando una Tarjeta de Disparo falla en disparar, 1/3 de la energía se pierde, y puede causar cambios momentáneos de velocidad en el motor repetidamente. Esto puede conducir a altas amplitudes a 1/3X y 2/3X de la Frecuencia SCR (1/3X SCR Frec. = 1XF_L para SCR Rectificados a Onda Media, pero 2XF_L para SCR Rectificados a Onda Completa). Precaución: La configuración de la Tarjeta/SCR debe ser conocida antes de reparar el motor (#SCR, #Tarjetas de Disparo, etc.).</p>
D. SCR Defectuoso, Tarjeta de Control en Corto, Conexiones Flojas o Fusible Quemado		<p>Las Fallas de SCR, Tarjetas de Control en Corto y/o Conexiones Flojas pueden generar picos de amplitud notable en numerosas combinaciones de frecuencia de línea (F_L) y frecuencia de disparo SCR. Normalmente, 1 SCR malo puede causar altos niveles a F_L y/o 5 F_L en motores 6SCR. El punto es que tanto F_L, 2F_L, 3F_L, 4F_L, y 5F_L no deben estar presentes en el Espectro de Motor DC.</p>
E. Tarjeta de Comparador Defectuosa		<p>Las Tarjetas de Comparador Defectuosas causan problemas con la fluctuación de la RPM o "caza". Esto ocasiona un colapso y regeneración constante del campo magnético. Estas bandas laterales a menudo se aproximan a la RPM de fluctuación y requiere de un FFT de alta resolución para apenas ser detectadas. estas bandas laterales pueden también deberse a generación y regeneración del campo magnético.</p>
F. Paso de Corriente a través de los Rodamientos del Motor DC		<p>El Fluting inducido eléctricamente es detectado normalmente por una serie de diferencia de frecuencias espaciadas mas o menos a la frecuencia de defecto de pista externa (BPFO), aun si ese Fluting esta presente tanto en la pista externa como en la pista interna. A menudo aparecen en un rango centrado cerca de 100,000 a 150,000 CPM. Un espectro a 180K con 1600 líneas es recomendado para detectar haciendo mediciones en los rodamientos OB e IB del Motor DC.</p>

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	OBSERVACIONES
Problemas de Transmisión de Correas A. Desgaste, Aflojamiento o Descuadre de las Correas 		<p>FREC. DE LA CORREA = $\frac{1}{2} \times \text{RPM DE LA POLEA} \times \text{DIAMETRO PRIMARIO} / \text{LONGITUD DE LA CORREA}$</p> <p>FREC. DE LA CORREA DENTADA = $\text{FREC. DE LA CORREA} \times \text{\# DIENTES DE LA CORREA} = \text{RPM DE LA POLEA} \times \text{\# DIENTES DE LA POLEA}$</p> <p>La Frecuencia de la Correa esta por debajo de las RPM del motor o de la máquina conducida. Cuando están desgastadas, flojas o descuadradas, normalmente causan de 3 a 4 múltiplos de frecuencia de correa. A menudo la frecuencia 2X de la correa es el pico dominante. La amplitudes son normalmente inestables algunas veces pulsando tanto con la RPM del conductor o del conducido. En correas dentadas, el desgaste o desalineación de la polea es indicado por altas amplitudes a la Frecuencia de la Correa Dentada. Las transmisiones de cadena indicarán problemas a la Frecuencia de Paso de Cadena que es igual a #Dientes del Piñón X RPM.</p>
B. Desalineación de la Correa/Polea 		<p>La desalineación de la polea produce alta vibración a 1XRPM predominantemente en la dirección axial. El radio de las amplitudes de las RPM de la polea conductora a la conducida depende de donde se toman los datos, así como de la masa relativa y la rigidez del bastidor. A menudo con la desalineación de la polea la vibración axial mas elevada se encontrara a las RPM del ventilador, o vice versa. Puede ser confirmada por mediciones de fase colocando el Filtro de Fase a las RPM de la polea con mayor amplitud axial; luego compare las fases a esta frecuencia en particular en cada rotor en la dirección axial.</p>
C. Poleas Excéntricas 		<p>Las poleas excéntricas causan alta vibración a 1XRPM de la polea excéntrica. La amplitud es normalmente la mas alta cuando se encuentra alineada con las correas y debe aparecer tanto en los rodamientos de la polea conductora como en la conducida. En ocasiones es posible balancear las poleas excéntricas colocando arandelas e los pemos. Sin embargo, aunque se balancee, la excentricidad seguirá induciendo vibración y esfuerzo de fatiga reversible en la correa. La excentricidad de la polea puede ser confirmada por un análisis de fase que muestre la diferencia de fase horizontal y vertical cercana a 0° a 180°.</p>

TABLA I - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN

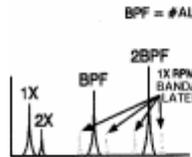
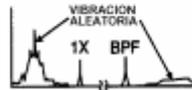
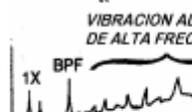
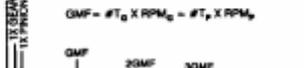
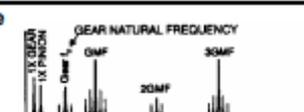
<p>RODAMIENTOS (4 Etapas de Falla)</p> <p>f_n = Frecuencias Naturales de los Componentes de los Rodamientos Instalados y Estructura de Soporte</p> <p>FRECUENCIAS DE DEFECTOS DE RODAMIENTO:</p> <p>$BPF = \frac{N_s}{2} (1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \theta) \times RPM$</p> <p>$BPO = \frac{N_s}{2} (1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \theta) \times RPM$</p> <p>$BSF = \frac{P_d}{2N_s} [1 - (\frac{B_d}{P_d})^2 \cos^2 \theta] \times RPM$</p> <p>$FTF = \frac{1}{2} (\frac{P_d}{P_s} \cos \theta) \times RPM$</p> <p>Where: BPF = Frecuencia de Pista Interna BPO = Frecuencia de Pista Externa BSF = Frecuencia de Giro de la Bola FTF = Frecuencia de la Jaula N_s = Número de Bolas o Rodillos B_d = Diámetro de Bola o Rodillo (in onces) P_d = Diámetro Primitivo θ = Angulo de Contacto (grados)</p>	<p>4 Etapas de Fallas de Rodamientos</p> <p>ETAPA 1</p> <p>ETAPA 2</p> <p>ETAPA 3</p> <p>ETAPA 4</p> <p>VIBRACION DE ALTA FRECUENCIA ALEATORIA</p> <p>gSE / HFD DISMINUYE AL COMENZAR A LUBRICAR CORRECTAMENTE HACIA EL FIN.</p>	<p>4 Etapas de Fallas de Rodamientos</p> <p>Etapa 1 Las indicaciones mas tempranas de que existen problemas con los cojinetes aparecen en las frecuencias ultrasónicas que van desde cerca de 250,000 - 350,000 Hz, luego cuando aumenta el desgaste, usualmente cae aproximadamente a 20,000 - 60,000 Hz (1,200,000 - 3,600,000 CPM). Estas frecuencias son evaluadas mediante el Pico de Energía (gSE), HFD e Impulso de Choque (dB). Por ejemplo, el pico de energía puede aparecer cerca de .25 gSE en la etapa 1 (el valor real depende de la ubicación de la medición y la velocidad de la máquina). Adquiriendo espectros de alta frecuencia confirma si el rodamiento falla o no en etapa 1.</p> <p>Etapa 2 Ligeros defectos del cojinete comienzan a "hacer sonar" las frecuencias naturales (fn) de los componentes del rodamiento, que ocurren predominantemente en el Rango de 30K-120KCPM. Esas frecuencias naturales pueden también ser resonancias de las estructuras de soporte del rodamiento. Al final de la etapa 2 aparecen frecuencias de banda lateral por encima y por debajo del pico de frecuencia natural. El pico de energía Overall crece (por ejemplo de .25 a .50gSE).</p> <p>Etapa 3 Aparecen frecuencias y armónicas de defectos en rodamientos. Cuando el desgaste progresa, mas frecuencias armónicas aparecen y el número de bandas laterales aumenta, ambas alrededor de estas y las frecuencias naturales de los componentes del rodamiento. El pico de energía overall sigue incrementando (por ejemplo de .50 a mas de 1gSE). El desgaste es ahora por lo general visible y se puede prolongar a la periferia del rodamiento, particularmente cuando bandas laterales bien formadas acompañan a las armónicas de la frecuencia de defecto de rodamiento. Espectros de alta frecuencia y cubiertos ayudan a confirmar la etapa 3.</p> <p>Reemplace el rodamiento ahora! (independientemente de las amplitudes de frecuencia de defecto de rodamiento en el espectro de vibraciones).</p> <p>Etapa 4 Hacia la parte final, la amplitud 1XRPM es incluso afectada. Crece y normalmente causa el aumento de numerosas armónicas de velocidad de giro. De hecho los discretos defectos del cojinete y las frecuencias naturales de los componentes comienzan a "desaparecer", y son reemplazados por un "ruido de piso" al azar, de banda ancha y alta frecuencia. Además las amplitudes del ruido de piso de alta frecuencia y el pico de energía disminuyen, sin embargo justo antes de que ocurra la falla, el pico de energía y el HFD crece por lo general a amplitudes excesivas.</p>
<p>FUENTE DEL PROBLEMA</p>	<p>ESPECTRO TÍPICO</p>	<p>OBSERVACIONES</p>
<p>Fuerzas Hidráulicas y Aerodinámicas</p> <p>A. Paso de Alabes</p> <p>B. Turbulencia del Flujo</p> <p>C. Cavitación</p>	<p>$BPF = \#ALABES \times RPM$</p>   <p>VIBRACION ALEATORIA</p> <p>$BPF = FRECUENCIA DE PASO DE ALABES$</p>  <p>VIBRACION ALEATORIA DE ALTA FRECUENCIA</p> 	<p>La Frecuencia de Paso de Alabes (BPF)=N° de Alabes X RPM. Esta frecuencia es inherente en bombas, ventiladores y compresores y normalmente no representa problemas. Sin embargo las BPF (y armónicas) de gran amplitud pueden ser generadas en la bomba si el espacio entre los alabes de rotación y los difusores no es igual en todas ellas. También las BPF (o armónicas) pueden coincidir en ocasiones con una frecuencia natural del sistema causando alta vibración. Una BPF alta puede ser generada si el impulsor desgasta los anillos de agarre al eje o si falla la soldadura que sostiene a los alabes del difusor. También, las BPF altas pueden ser causadas por dobleces abruptos en la tubería (o ducto), obstrucciones que interrumpan el flujo, posiciones del Damper, o si el rotor se encuentra excéntrico dentro de la carcasa de la bomba o ventilador.</p> <p>La Turbulencia del Flujo ocurre en sopladores debido a variaciones en la presión o en la velocidad del aire pasando a través del ventilador o de la ductería. Esta interrupción causa turbulencia que genera una vibración a baja frecuencia aleatoria, típicamente en el rango de 50 a 2000 CPM. Si ocurre purga dentro del compresor, puede ocurrir una alta frecuencia de vibración de banda ancha al azar. Excesiva turbulencia puede también excitar la alta frecuencia de banda ancha.</p> <p>La Cavitación genera normalmente una energía de banda ancha de frecuencia muy alta aleatoria, que algunas veces se sobrepone con las frecuencias armónicas del paso de alabes. Normalmente indica insuficiente presión de succión (falta de alimentación). La cavitación puede ser un tanto destructiva para los elementos internos de la bomba si no es corregida. Puede particularmente erosionar los alabes del impulsor. Cuando esta presente, a menudo suena como si pasaran "piedras" a través de la bomba. La cavitación es usualmente causada por insuficiencia en el flujo de entrada. Puede ocurrir en un recorrido y estar ausente en el siguiente (si son realizadas modificaciones en la posición de las válvulas de succión).</p>
<p>Engranajes</p> <p>A. Espectro Normal</p>	<p>$GMF = \#T_d \times RPM_{\omega} = \#T_s \times RPM_{\omega}$</p> 	<p>El espectro normal muestra las velocidades del Engranaje y el Piñón junto con la Frecuencia de Engrane (GMF) y armónicas muy pequeñas de GMF. Las armónicas de GMF por lo general tienen bandas laterales de velocidad de giro. Todos los picos son de baja amplitud y no se excitan las frecuencias naturales de los engranajes. La F_{GMF} recomendada es a 3.25XGMF (mínima) cuando el número de dientes sea conocido. Si no se conoce el número de dientes, utilice F_{GMF} a 200XRPM en cada eje.</p>
<p>B. Desgaste del Diente</p> 	<p>GEAR NATURAL FREQUENCY</p> 	<p>Un indicador clave del desgaste uniforme del diente es la excitación de la frecuencia natural del engranaje (f_n), junto con las bandas laterales alrededor espaciadas a la velocidad de giro del engranaje dañado. La Frecuencia de Engrane (GMF) puede o no cambiar en amplitud, aunque bandas laterales de gran amplitud y un número de bandas rodeando a GMF usualmente aparecen cuando el desgaste es notable. Las bandas laterales pueden ser mejor indicador que las mismas frecuencias GMF. También pueden ocurrir grandes amplitudes tanto a 2XGMF como a 3XGMF, aun si la amplitud de GMF es aceptable.</p>
<p>C. Carga del Diente</p>		<p>Las frecuencias de engrane a menudo son muy sensibles a la carga. Amplitudes altas de GMF no necesariamente indican un problema, particularmente si las frecuencias de banda lateral permanecen a un nivel bajo y no hay frecuencias naturales de engranaje excitadas. Cada análisis debe ser realizado con el sistema operando a carga máxima para una comparación espectral significativa.</p>
<p>D. Excentricidad del Engranaje y Juego entre los Dientes</p>		<p>A menudo bandas laterales de gran amplitud alrededor de las armónicas de GMF sugieren excentricidad del engranaje, juego o ejes no paralelos que permiten que la rotación de un engranaje "module" la velocidad de giro del otro. El engranaje problemático es indicado por el espacio de la frecuencia de banda lateral. También el nivel de 1XRPM del engranaje excéntrico será alto si la excentricidad es el problema dominante. Un juego entre los dientes inadecuado normalmente excita las armónicas de GMF y la frecuencia natural del engranaje, las que generan bandas laterales a 1XRPM. Las amplitudes de GMF generalmente disminuyen con el incremento de la carga si el juego es el problema.</p>

TABLA I - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN

<p>D. Resonancia de Correa</p>	<p>RADIAL 1X RPM</p>	<p>La Resonancia de la Correa puede ocasionar amplitudes altas si la frecuencia natural de la correa llega a aproximarse, o coincidir ya sea con las RPM del motor o de la máquina. La frecuencia natural de la correa puede ser alterada cambiando la tensión, longitud o sección transversal de la correa. Puede ser detectada tensionando y luego soltando la correa mientras se mide la respuesta en las poleas y rodamientos. Sin embargo, cuando esta operando, las frecuencias naturales de la correa tenderán a ser un poco más altas en el lado tensionado y un poco más bajas en el lado flojo.</p>
<p style="text-align: center;">Pulsaciones</p> <p>DOS FRECUENCIAS DESFAZADAS 180°</p> <p>DOS MOVIMIENTOS ARMONICOS SIMPLES DE FRECUENCIA DIFERENTE</p> <p>F_1, F_2</p> <p style="text-align: center;">$F_0 = F_2 - F_1 = \text{FRECUENCIA DE PULSACION}$</p> <p>FRECUENCIA DE PULSACION GENERADA POR LAS DOS FRECUENCIAS DE ARRIBA</p> <p>LA MINIMA VIBRACION OCURRE CUANDO 2 FRECUENCIAS ESTAN 180° FUERA DE FASE</p> <p>LA MAXIMA VIBRACION OCURRE CUANDO 2 FRECUENCIAS ESTAN EN FASE</p>		<p>La Frecuencia de Golpeteo es el resultado de frecuencias cercanas que entran y salen de sincronización entre sí. El espectro de banda ancha normalmente mostrara un pico pulsando arriba y abajo. Al hacer un acercamiento a este pico (espectro bajo), se observan dos picos muy cercanos. La diferencia entre estos dos picos ($F_2 - F_1$) es la frecuencia de golpeteo, que aparece por sí misma en el espectro de banda ancha. La frecuencia de golpeteo no se ve comúnmente en mediciones de rango de frecuencia normales, ya que es inherentemente una frecuencia baja, fluctuando usualmente entre 5 a 100 CPM.</p> <p>La vibración máxima se alcanza cuando la onda de tiempo de una frecuencia (F_1) entra en fase con la onda de tiempo de la otra frecuencia (F_2). La vibración mínima ocurre cuando la onda de tiempo de estas dos frecuencias se alinean 180° fuera de fase.</p> <p style="text-align: right;">ESPECTRO DE BANDA ANCHA</p> <p style="text-align: right;">ZOOM DEL ESPECTRO</p>
<p style="text-align: center;">Pata Floja, Pata Resorteada y Resonancia de Pata</p> <p style="text-align: center;">RADIAL 1X RPM (Tip.)</p>		<p>"Pata Floja" ocurre cuando la pata de una máquina o el bastidor se deflecta cuando un perno de sujeción se afloja, causando el levantamiento de la pata aprox. mas de .002 - .003 pulgadas. esto no siempre causa un gran incremento de la vibración. sin embargo, podría hacerlo si la pata floja afecta la alineación o el entrehierro del motor.</p> <p>"Pata Resorteada" puede causar gran distorsión del bastidor, resultando en un incremento de la vibración, fuerza y esfuerzo del bastidor y carcaza del rodamiento, etc. Esto puede ocurrir cuando un perno de sujeción es ajustado excesivamente en la pata como un intento de nivelarla.</p> <p>"Resonancia de la Pata" puede causar incrementos dramáticos de la amplitud de 5 a 15 veces o mas, si se compara con aquella cuando el perno (o combinación de pernos) están flojos o apretados a mano. Cuando se ajusta, este perno puede cambiar notablemente la frecuencia natural del mismo bastidor de la máquina.</p> <p>La Pata Floja, Pata Resorteada o la Resonancia de la Pata afecta mas a menudo a 1XRPM, pero también puede hacerlo a 2XRPM, 3XRPM, 2XF₁, frecuencia de paso de alabe, etc. (particularmente la resonancia de pata).</p>

Anexo 4: Tablas de severidad



Calle Madrid 148 3er piso Urb. Mayorazgo Ate – Lima
 ventas@predictivototal.com.pe – servicios@predictivototal.com.pe
 www.predictivototal.com.pe
 (511) Cel.: 015037668 / 997954036

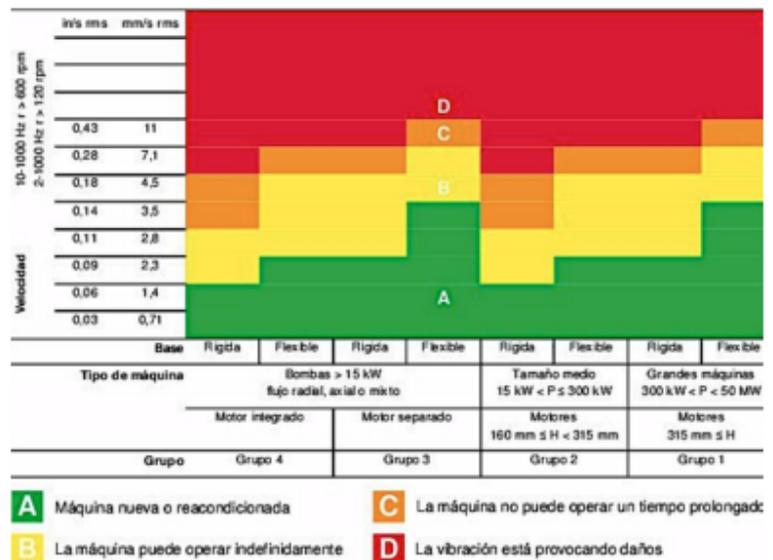
Para la colecta de datos de vibraciones del equipo se utilizó el siguiente instrumento:

- Colector Online Marca EMERSON CSI 2600T de 24 Canales.
- Analizador de Vibraciones Marca CSI 2140 de 04 Canales.
- Software de Mantenimiento Predictivo Machinery Health Manager Version 5.61

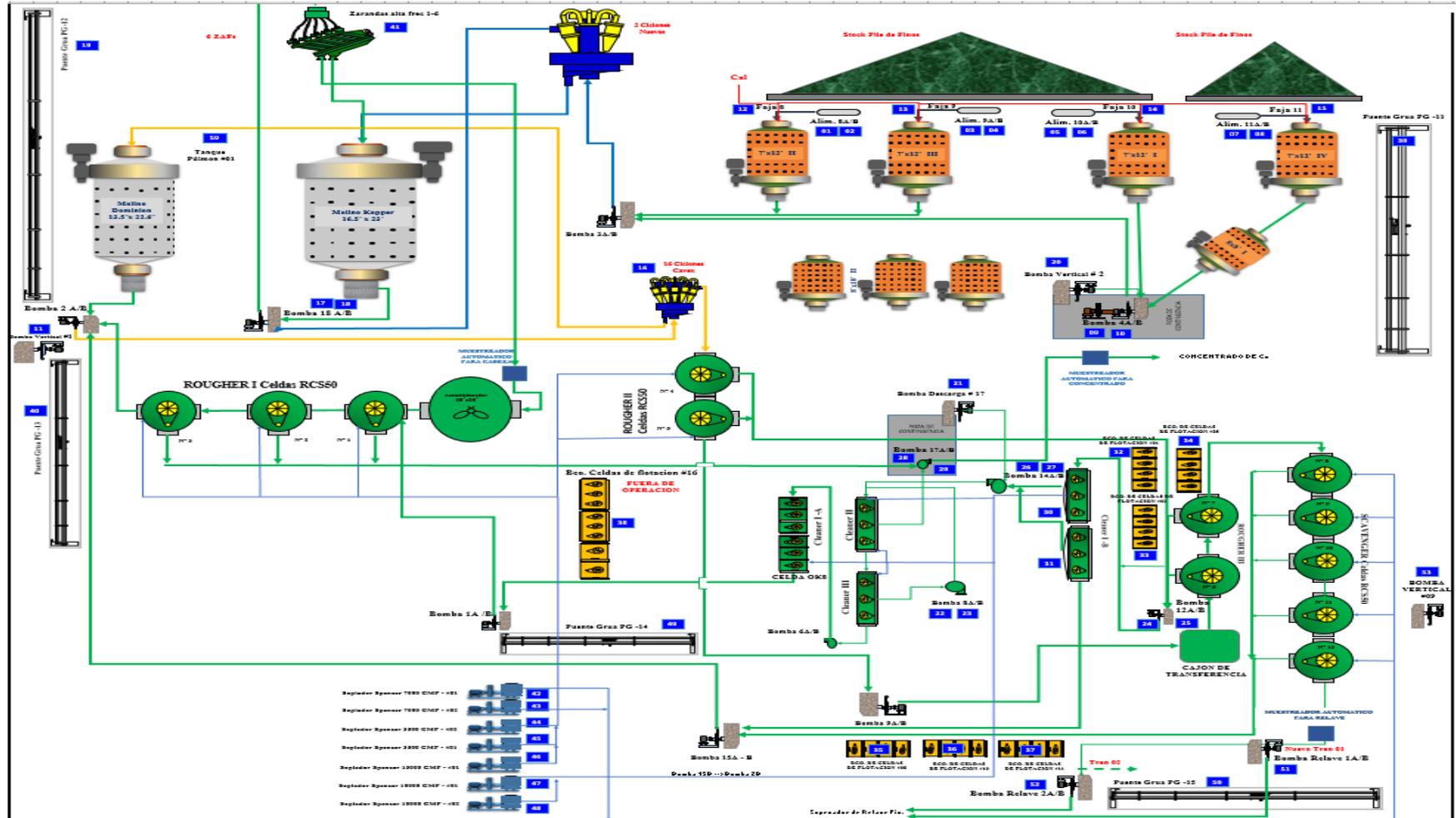
La técnica utilizada fue:

- Colección de Espectros de vibración en velocidad RMS. Para observar el comportamiento del entorno mecánico de los equipos.
- Se consideró como Grupo 1 - Rígido dentro de la severidad establecida según la norma ISO 10816.

- Bueno:
<2.30 mm/seg
- Satisfactorio:
<4.5 mm/seg
- Alerta:
<7.10 mm/seg
- Emergencia:
>7.10 mm/seg



Anexo 5: Hoja de Flujo de la Planta 1



Anexo 6: Evaluación de criticidad de activos de los Equipos rotatorios- Planta 1

EVALUACIÓN DE CRITICIDAD DE ACTIVOS (Equipos Rotativos) - SMEB								
Descripción del Activo	Frecuencia de Falla	Impacto en la Producción	Tiempo Promedio para Reparar MTTR	Costo de Reparación	Impacto en la Seguridad	Impacto en el Medio Ambiente	Puntaje de Evaluación	C = Criticidad del Activo
	1	0.2	0.15	0.15	0.25	0.25		
FAJA TRANSPORTADORA N° 11 *CH3	20	20	10	15	10	10	32.75	4
FAJA TRANSPORTADORA N° 12 *CH3	20	20	10	15	10	10	32.75	4
FAJA TRANSPORTADORA N° 6 *CH3	10	20	10	15	10	10	22.75	3
FAJA TRANSPORTADORA N° 7 *CH3	20	20	10	15	10	10	32.75	4
FAJA TRANSPORTADORA N° 8 *CH3	10	20	10	15	10	10	22.75	3
ZARANDA VIBRATORIA BANANA 12' X 26' LUDOWICI N°3 *CH3	20	20	15	15	10	10	33.5	4
BOMBA CENTRIFUGA HORIZONTAL N° 1 B 10X8 FFAH A05/A05 *CH3 BP1	15	10	10	10	10	10	25	4
BOMBA CENTRIFUGA HORIZONTAL N° 1A 10X8 FFAH A05/A05 *CH3 BP1A	15	10	10	10	10	10	25	4
TAMBOR LAVADOR 3.6 M X 12 M 600KW INCLUYE SIST. HIDRAULICO *CH3	10	20	20	20	10	10	25	4
ZARANDA VIBRATORIA BANANA 10' X 24' LUDOWICI N°1 *CH3	20	20	15	15	10	10	33.5	4
ZARANDA VIBRATORIA BANANA 10' X 24' LUDOWICI N°2 *CH3	10	20	15	15	10	10	23.5	3
FAJA TRANSPORTADORA 42" X 147' N° C1 *P2	20	20	15	15	10	10	33.5	4
FAJA TRANSPORTADORA 42" X 356' C/ TRIPPER N° C2 *P2	20	20	15	15	10	10	33.5	4
FAJA TRANSPORTADORA CX1	15	20	10	10	10	10	27	4
ACONDICIONADOR 20' X 20' C/ MECANISMO AGITADOR PB *P1	10	20	15	15	10	10	23.5	3
CELDA DE FLOTACION METSO RCS 50 *P1 Rougher 1 CU	5	20	20	20	10	10	20	3
CELDA DE FLOTACION METSO RCS 50 *P1 Rougher 2 CU	5	20	20	20	10	10	20	3
CELDA DE FLOTACION METSO RCS 70 *P1 Rougher II Bulk N° 1 - PB FINO	5	20	20	20	10	10	20	3
CELDA DE FLOTACION METSO RCS 70 *P1 Scavenger II Bulk N° 2 - PB FINO	5	20	20	20	10	10	20	3
FAJA TRANSPORTADORA N° 10 24" X 123' *P1	10	10	10	15	10	10	20.75	3
FAJA TRANSPORTADORA N° 11 24" X 125' *P1	10	10	10	15	10	10	20.75	3
FAJA TRANSPORTADORA N° 8 24" X 134' *P1	10	10	10	15	10	10	20.75	3
FAJA TRANSPORTADORA N° 9 24" X 125' *P1	10	10	10	15	10	10	20.75	3
MOLINO DE BARRAS 7' X 12' N° 1 COMESA *P1 MOL PRIM	20	10	10	15	5	10	29.5	4
MOLINO DE BARRAS 7' X 12' N° 2 *P1 MOL PRIM	20	10	10	15	5	10	29.5	4
MOLINO DE BARRAS 7' X 12' N° 3 COMESA *P1 MOL PRIM	20	10	10	15	5	10	29.5	4
MOLINO DE BARRAS 7' X 12' N° 4 COMESA *P1 MOL PRIM	20	10	10	15	5	10	29.5	4
MOLINO DE BOLAS 16.5' X 23' KOPPERS *P1 MOL SECUNDARIA	20	20	15	15	5	10	32.25	4
MOLINO DE BOLAS 13.5' X 22' 8" DOMINION *P1 MOL TERCIARIA	15	20	15	15	5	10	27.25	4
MOLINO DE BOLAS 8' x 10' N° 3 COMESA *P1 REMOL ZN/CU	10	20	15	15	5	10	22.25	3
MOLINO DE BOLAS 20' X 30' *P2	20	20	20	15	10	10	34.25	4
BOMBA CENTRIFUGA HORIZONTAL N° 2 A 14X12 STAH R55/A05 *P2 BP2A	10	10	10	10	10	10	20	3
BOMBA CENTRIFUGA HORIZONTAL N° 2 B 14X12 STAH R55/A05 *P2 BP2B	10	10	10	10	10	10	20	3
MOLINO DE BOLAS 16' X 22' OSBORN *P2	10	20	20	20	10	10	25	4
BOMBA HORIZONTAL 8X6	10	20	10	10	10	10	22	3
BOMBA HORIZONTAL WARMAN 8X6	10	20	10	10	10	10	22	3
MOLINO DE BOLAS 9.5' X 14' COMESA *P2 REMOL PB	15	20	20	20	10	10	30	4
BOMBA HORIZONTAL 10X8	5	15	10	10	10	10	16	2
BOMBA HORIZONTAL WARMAN 10X8	5	15	10	10	10	10	16	2
MOLINO DE BOLAS 9.5' X 12' COMESA *P2 REMOL ZN	5	15	15	20	10	10	18.25	2
MOLINO DE BOLAS 9.5' X 12' COMESA *P2 REMOL ZN	5	15	15	20	10	10	18.25	2
FAJA TRANSPORTADORA N° C3 *P2	5	20	15	15	10	10	18.5	2
FAJA TRANSPORTADORA N° C4 *P2	5	20	15	15	10	10	18.5	2

Anexo 7: Configuración del Software MHM, en los puntos de sensado

Fecha: 27/02/2022

Configuración de la comunicación del punto 1 al Software MHM

The screenshot shows the MHM software interface for 'cia buenaventura brocal_1.rbm - Online Watch'. The left pane displays a tree view of the project structure, including 'Working Folders', 'Areas', and 'Units'. The right pane shows the configuration for 'MOTOR CONTR - MOTOR CONTRAEJE MOLINO KUPPER' with a 'Last Report' of '09-Sep-21 19:3'. Below this, a table lists measurement points:

#	Description
1VH	VEL HORIZONTAL 150.00 RPM
1VV	VEL VERTICAL L I 150.00 RPM
1VA	VEL AXIAL L LIBRE 150.00 RPM
2VH	VEL HORIZONTAL 150.00 RPM
2VV	VEL VERTICAL L / 150.00 RPM

Fecha 28/02/2022

Configuración de la comunicación del punto 2 al Software MHM.

The screenshot shows the MHM software interface for 'cia buenaventura brocal_1.rbm - Online Watch'. The left pane displays the project structure, and the right pane shows the configuration for 'MOTOR CONTR - MOTOR CONTRAEJE MOLINO KUPPER' with a 'Last Report' of '15-Sep-21 22:3'. Below this, a table lists measurement points:

#	Description
1VH	VEL HORIZONTAL 150.00 RPM
1VV	VEL VERTICAL L I 150.00 RPM
1VA	VEL AXIAL L LIBRE 150.00 RPM
2VH	VEL HORIZONTAL 150.00 RPM

Fecha 28/02/2022

Configuración de la comunicación del punto 3 al Software MHM.

cia buenaventura brocal_1.rbm - Online Watch

File View Tools Help

CIA BUENAVENTURA BROCAL_1.RBM - \\DESKTOP-LQN3200\

- Working Folders
- Areas
 - MOL - KUPPER
 - MOL - MOLINO KUPPER
 - MOTOR CONTR - MOTOR CONTRAEJE MOLINO K
 - 1VH - VEL HORIZONTAL L LIBRE
 - 1VV - VEL VERTICAL L LIBRE
 - 1VA - VEL AXIAL L LIBRE
 - 2VH - VEL HORIZONTAL L ACOUPLE
 - 2VV - VEL VERTICAL L ACOUPLE**
 - 3VH - CONTRAEJE L ACOUPLE
 - 3VV - CONTRAEJE L ACOUPLE
 - 4VH - CONTRAEJE L LIBRE
 - 4VV - CONTRAEJE L LIBRE
 - 4VA - CONTRAEJE AXIAL
 - 2VA - VEL AXIAL ACOUPLE
 - 3VA - CONTRAEJE L ACOUPLE

Units

2VV - VEL VERTICAL L

Last Report: 22-Set-21 17:45:57

Data Collection Sets:

Description	Urgency	Last Report
DCS1	Critical	22-Set-21 17:45:57

Analysis Parameters (for selected data collection set):

#	Description	Last Report
1	VIB TOTAL	7.818 r 22-Set-21

Fecha 29/02/2022

Configuración de la comunicación del punto 4 al Software MHM.4

cia buenaventura brocal_1.rbm - Online Watch

File View Tools Help

CIA BUENAVENTURA BROCAL_1.RBM - \\DESKTOP-LQN3200\

- Working Folders
- Areas
 - MOL - KUPPER
 - MOL - MOLINO KUPPER
 - MOTOR CONTR - MOTOR CONTRAEJE MOLINO KUPPER**
 - 1VH - VEL HORIZONTAL L LIBRE
 - 1VV - VEL VERTICAL L LIBRE
 - 1VA - VEL AXIAL L LIBRE
 - 2VH - VEL HORIZONTAL L ACOUPLE
 - 2VV - VEL VERTICAL L ACOUPLE
 - 3VH - CONTRAEJE L ACOUPLE
 - 3VV - CONTRAEJE L ACOUPLE
 - 4VH - CONTRAEJE L LIBRE
 - 4VV - CONTRAEJE L LIBRE
 - 4VA - CONTRAEJE AXIAL
 - 2VA - VEL AXIAL ACOUPLE
 - 3VA - CONTRAEJE L ACOUPLE

Units

MOTOR CONTR - MOTOR C

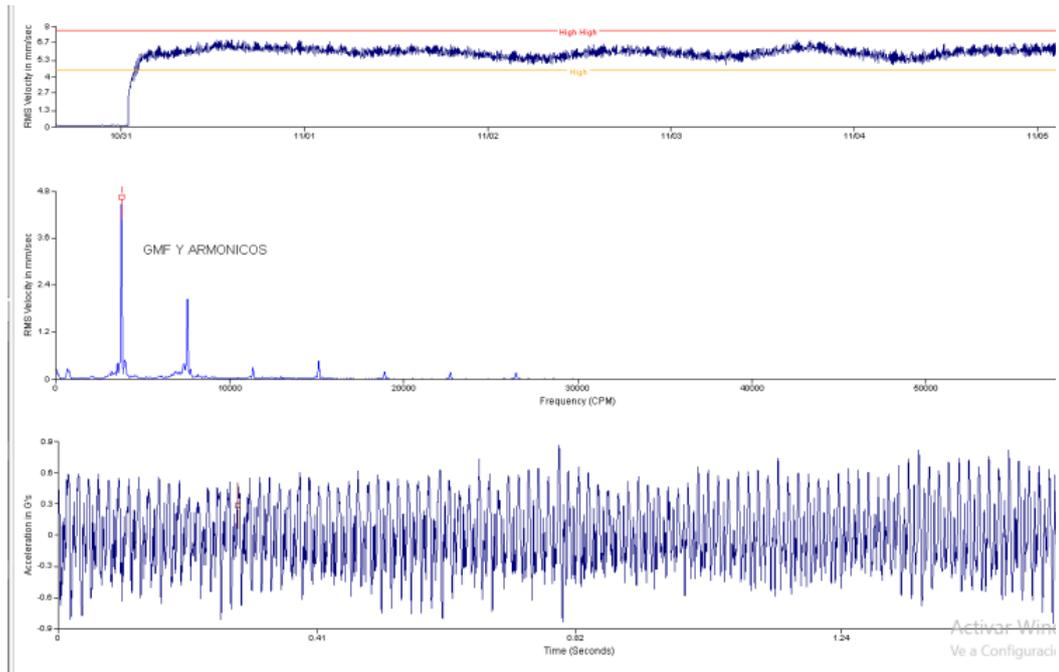
Last Report: 29-Set-21 08:11:23

Measurement Points Table

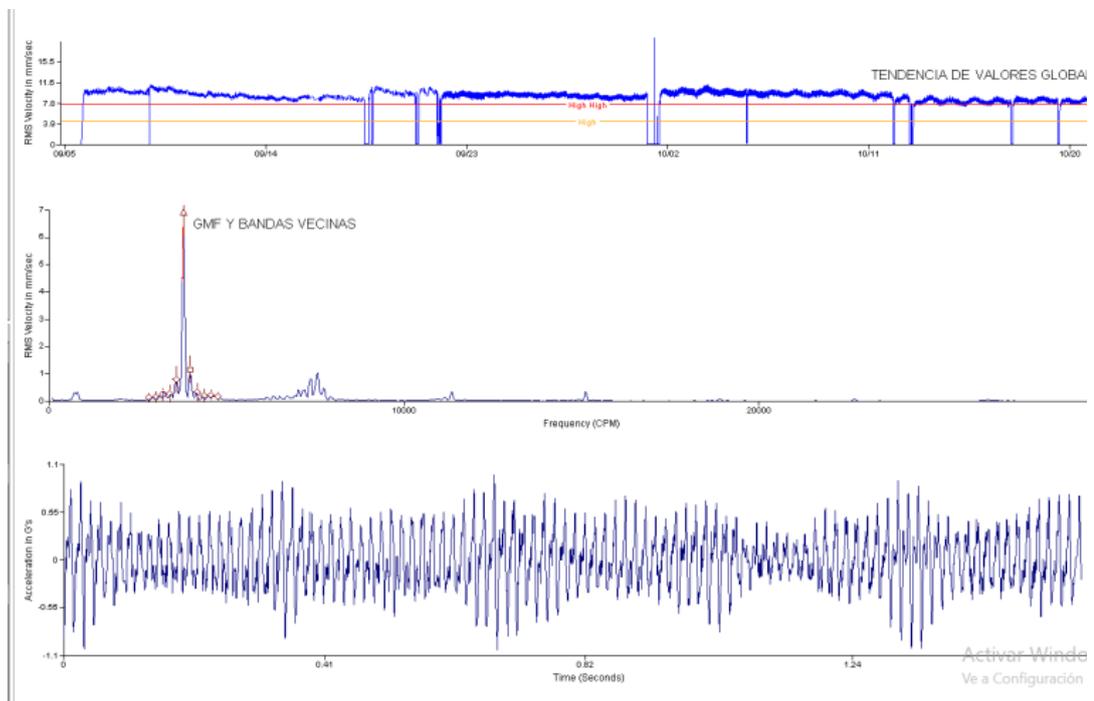
#	Description	Last Report
1VH	VEL HORIZONTAL 150.00 RPM	0.238 Gs p 27-Set-21 11.737 vol 27-Set-21
1VV	VEL VERTICAL L I 150.00 RPM	0.244 Gs p 27-Set-21 11.817 vol 27-Set-21
1VA	VEL AXIAL L LIBRI 150.00 RPM	0.348 Gs p 27-Set-21 11.808 vol 27-Set-21
2VH	VEL HORIZONTAL 150.00 RPM	0.288 Gs p 27-Set-21 11.955 vol 27-Set-21

Anexo 8: Espectros de los 4 puntos de acople del molino.

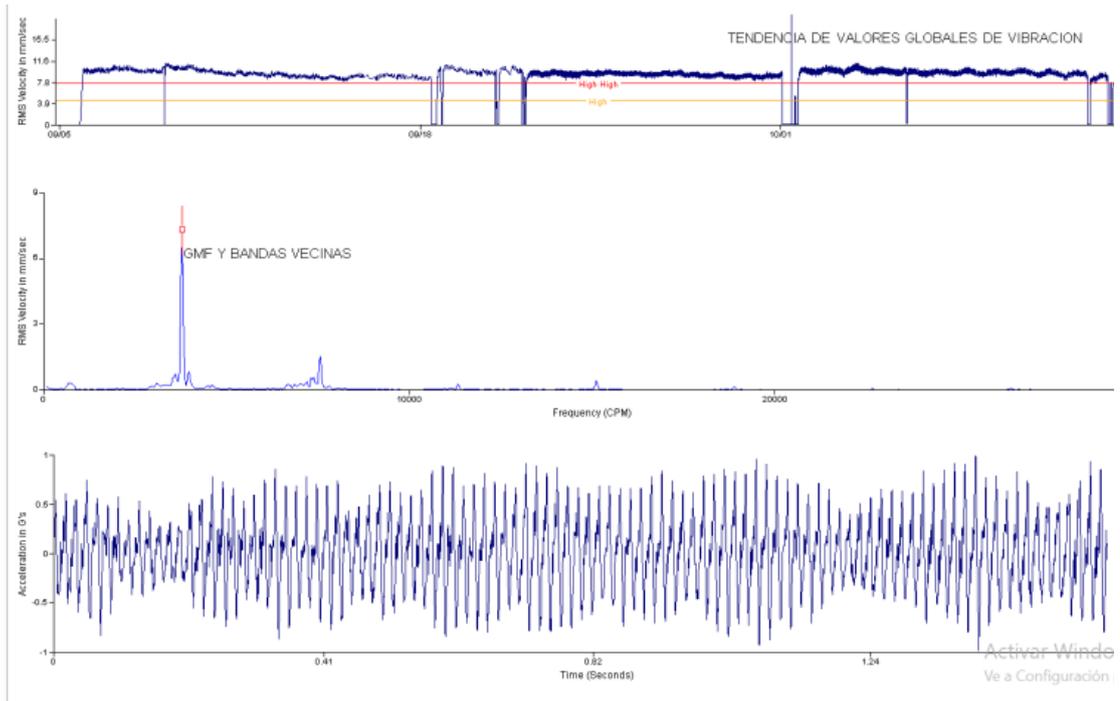
Punto 1: Lado libre del motor



Dirección Vertical

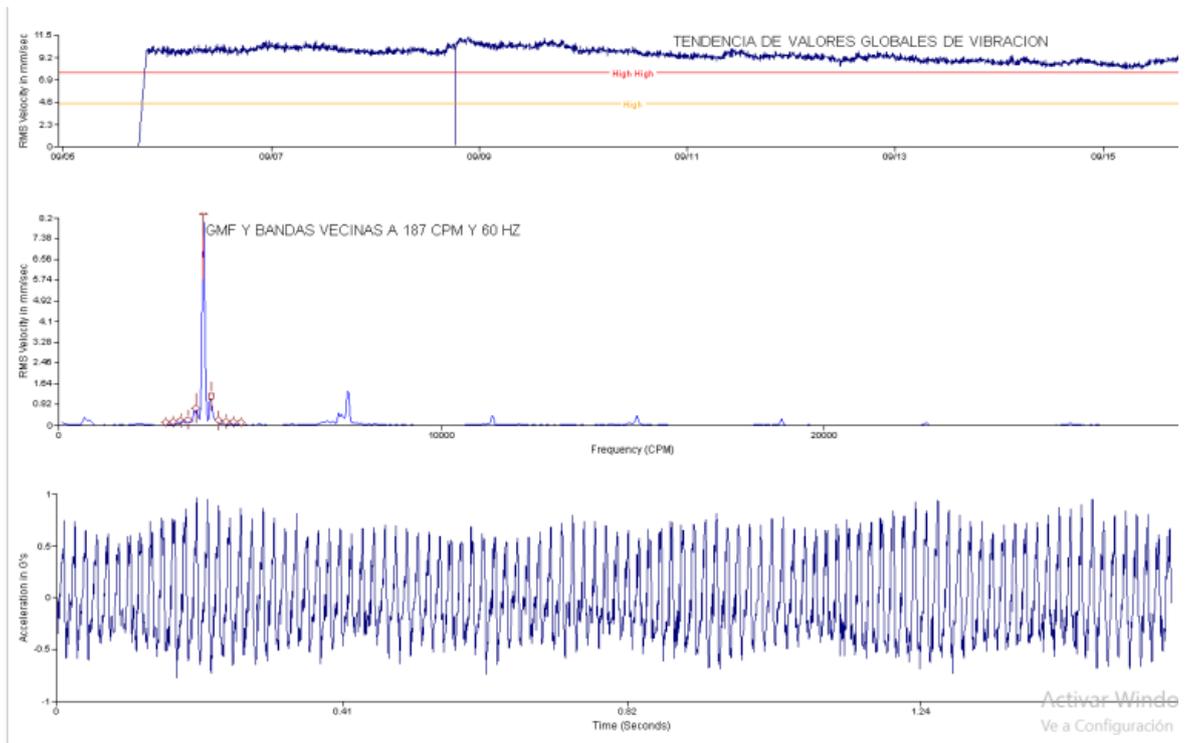


Dirección Axial

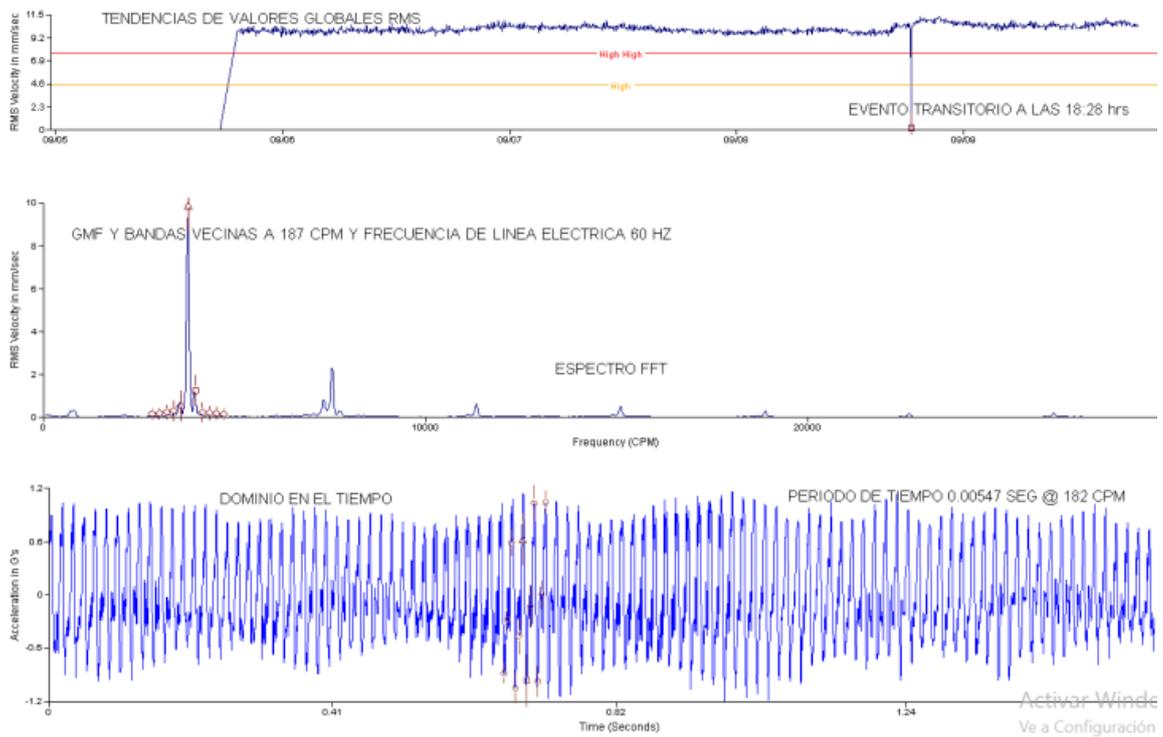


Dirección Horizontal

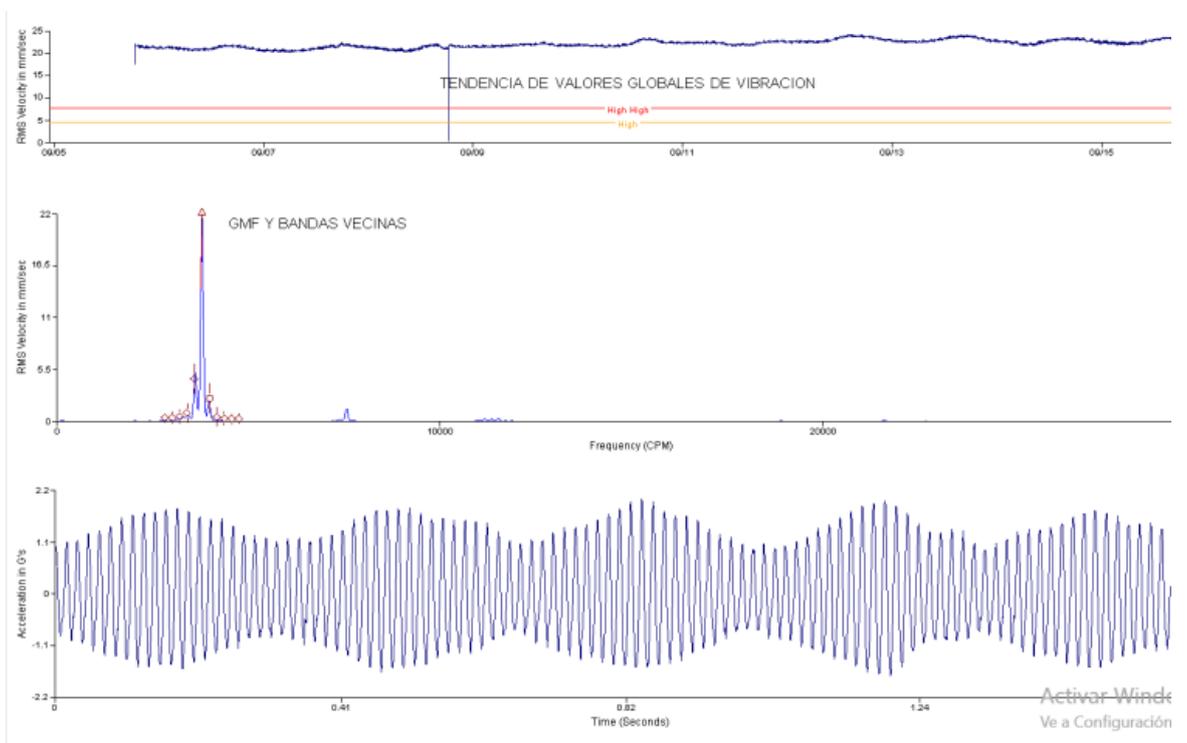
Punto 2: Lado acople del motor



Dirección Vertical

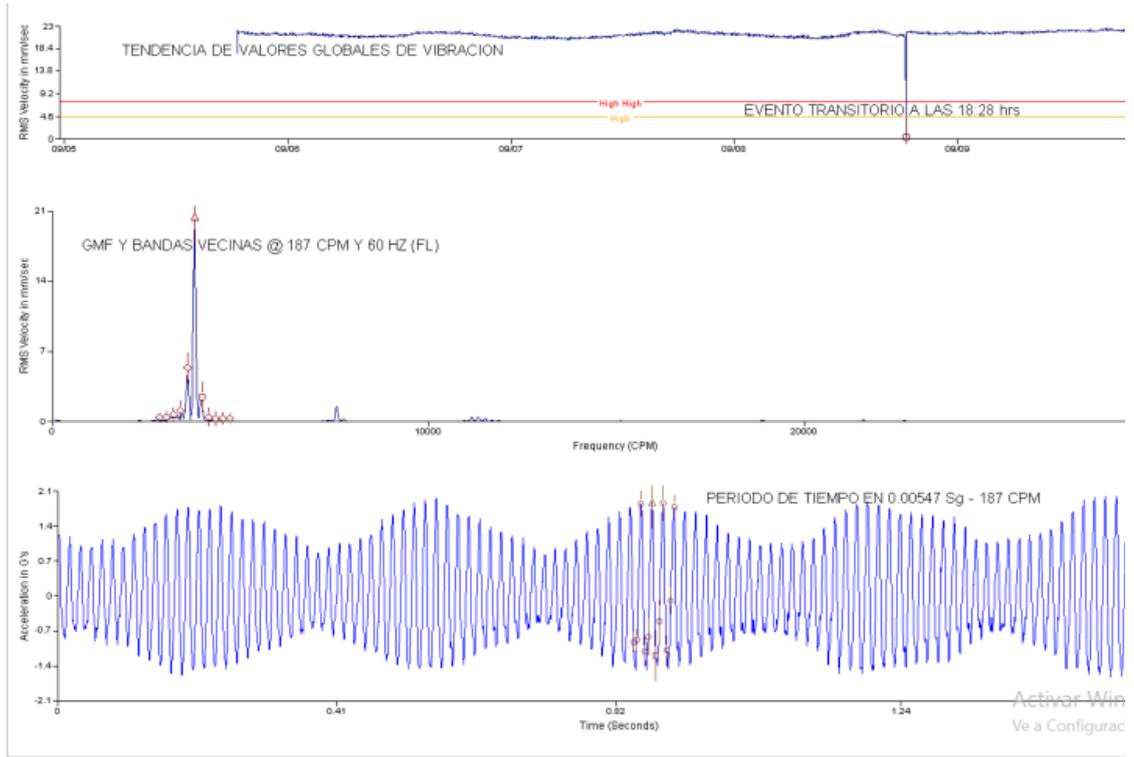


Dirección Axial

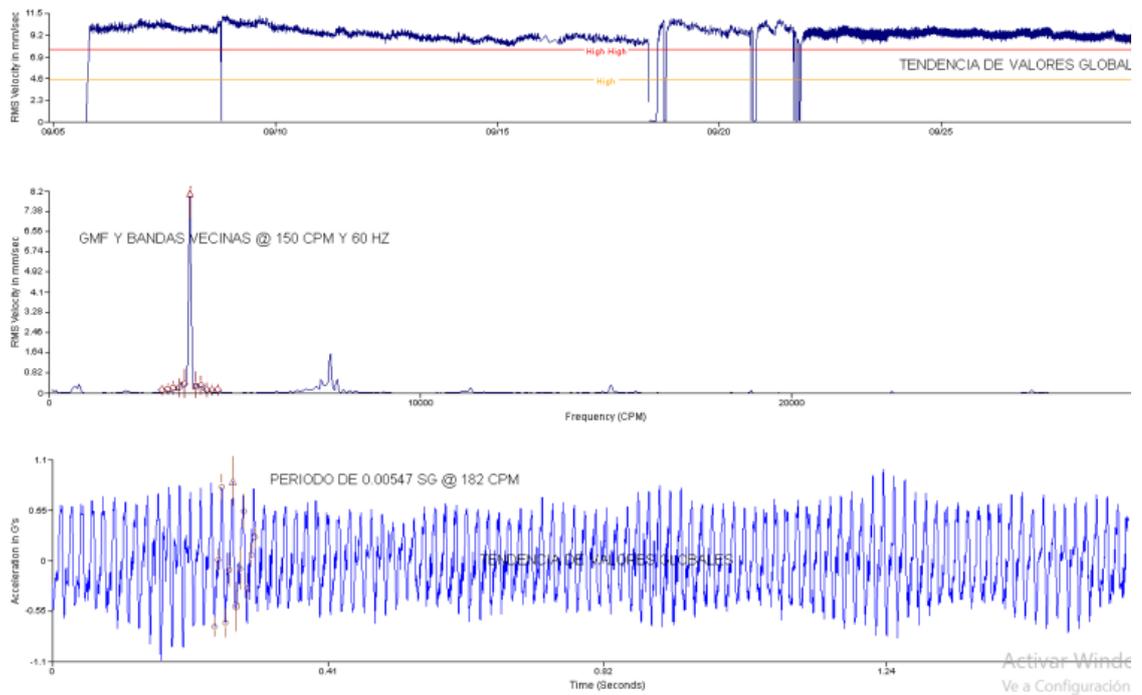


Dirección Horizontal

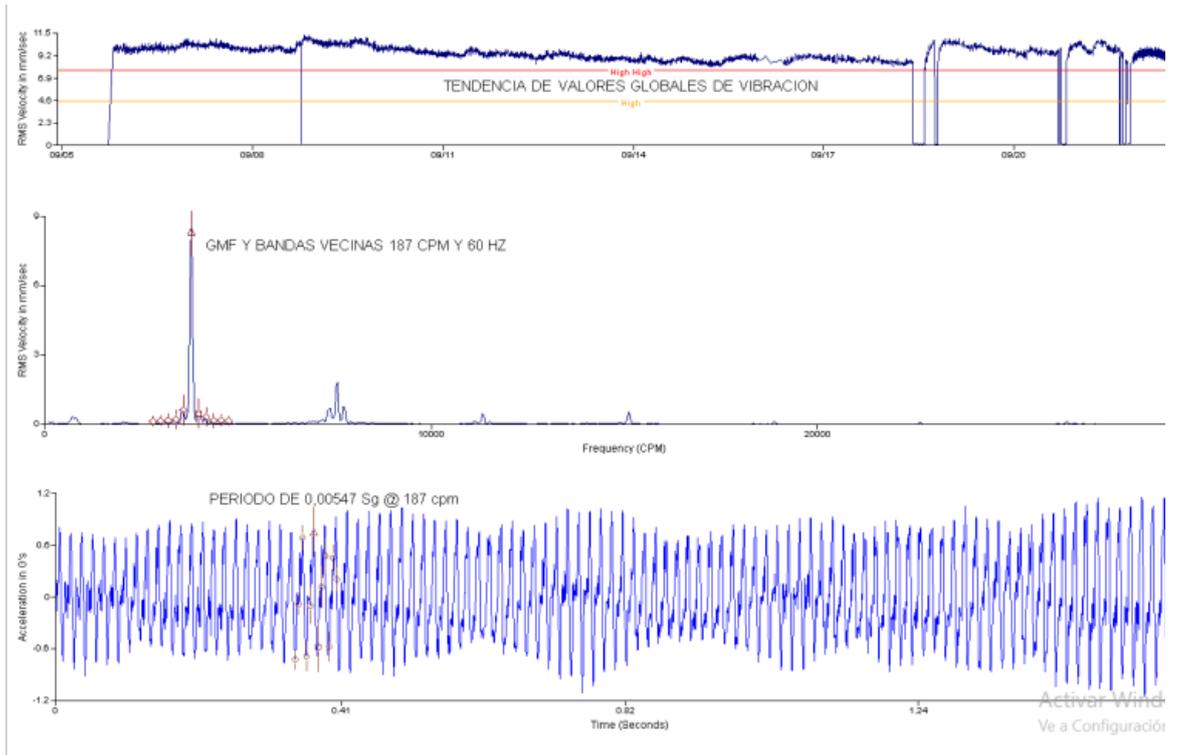
Punto 3: Lado acople del piñón



Dirección Vertical

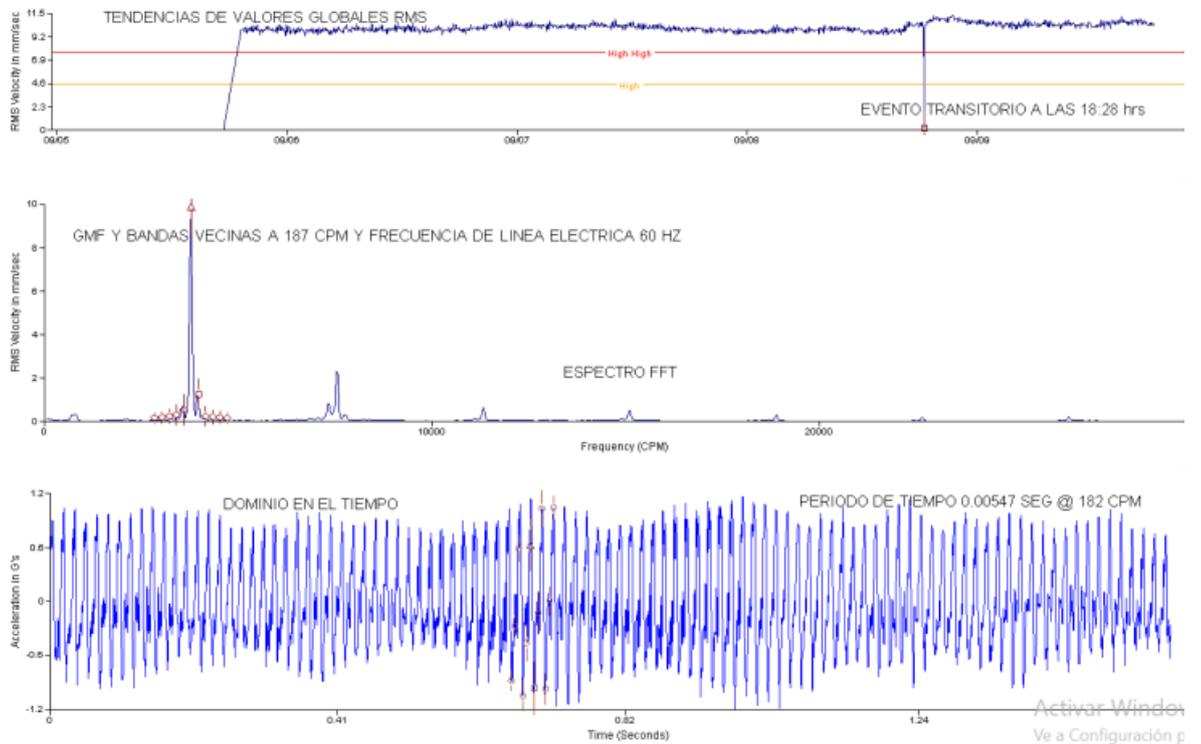


Dirección Axial

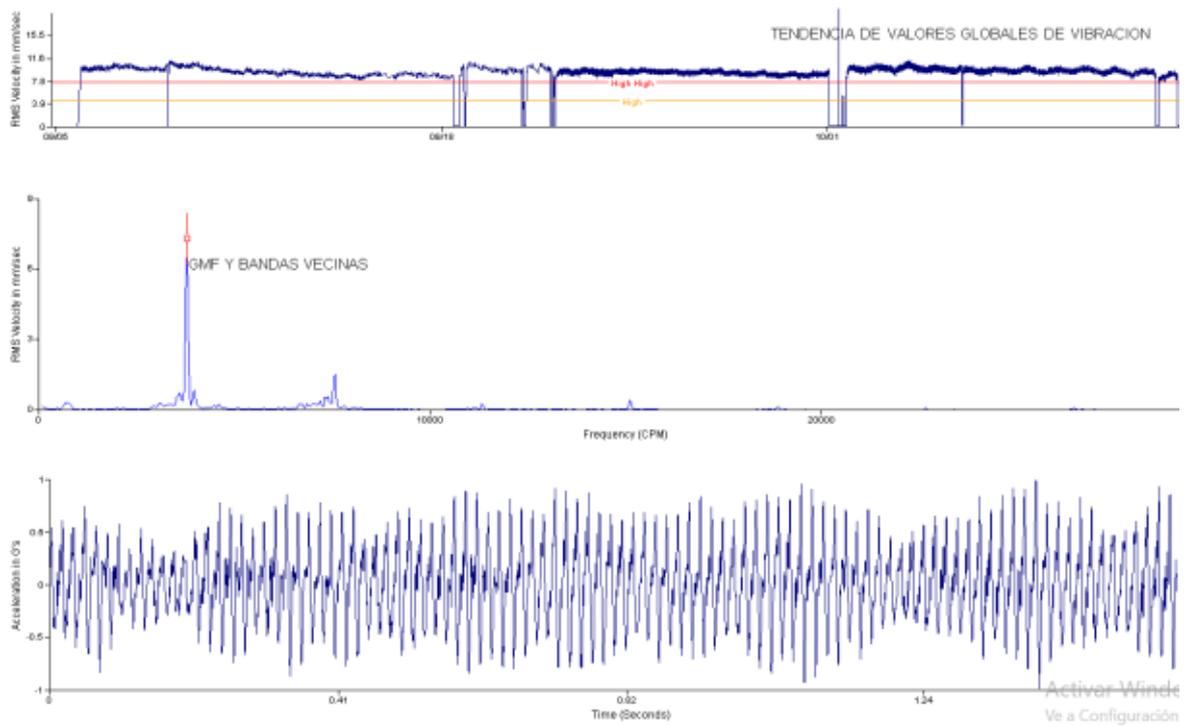


Dirección Horizontal

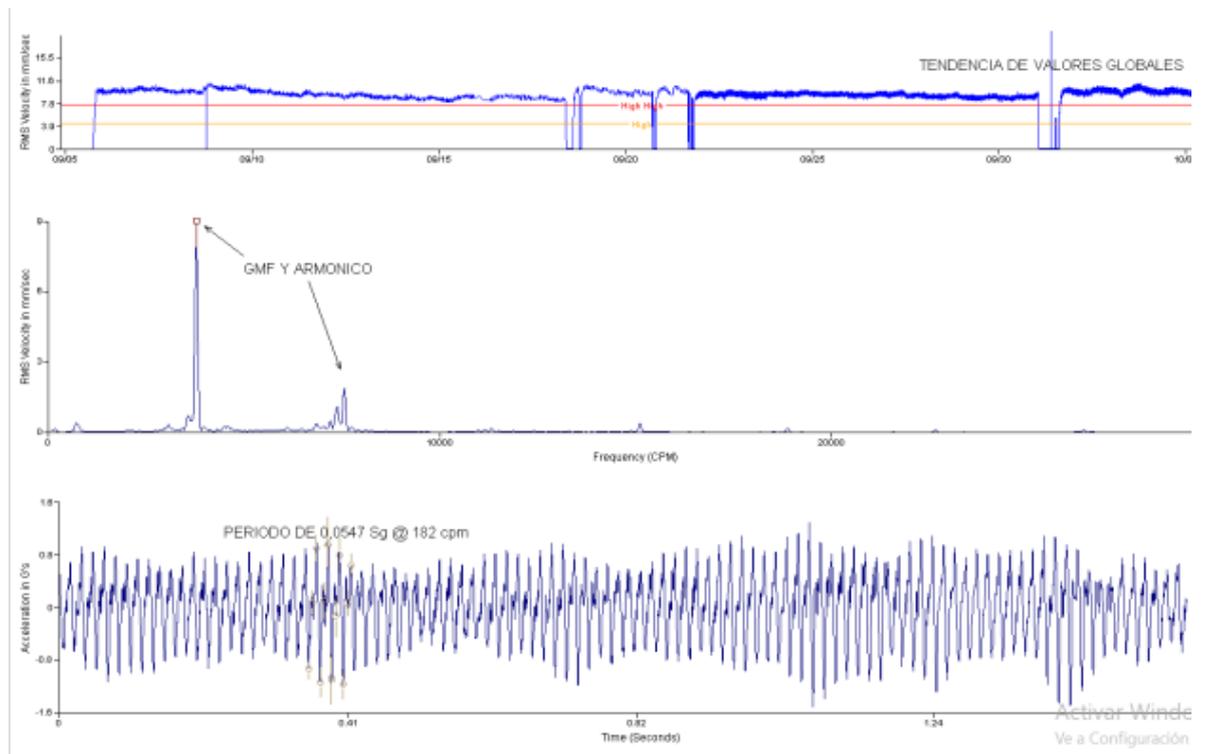
Punto 4: Lado libre del piñón



Dirección Vertical



Dirección Axial



Dirección Horizontal

Anexo 9: Valores Globales de vibración del molino de bolas

VALORES GLOBALES DE VIBRACIÓN MM/SG RMS																																			
COMPONENTE	PUNTOS	POSICIÓN	5-Set	6-Set	7-Set	8-Set	9-Set	10-Set	11-Set	12-Set	13-Set	14-Set	15-Set	16-Set	17-Set	18-Set	19-Set	20-Set	21-Set	22-Set	23-Set	24-Set	25-Set	26-Set	27-Set	28-Set	29-Set	30-Set	1-Oct	2-Oct	3-Oct	4-Oct	5-Oct		
MOTOR	1	HORIZON	3.60	3.21	3.50	3.51	3.40	3.00	3.24	3.12	2.98	2.98	3.14	3.09	3.11	4.00	4.64	4.02	4.03	3.61	3.64	3.47	3.91	4.38	4.35	3.97	3.44	3.81	3.63	3.49	4.25	3.76	3.48		
		VERTICAL	3.21	3.01	2.81	2.78	3.11	2.93	2.70	2.67	2.74	2.67	2.79	3.12	2.96	3.47	2.74	3.48	3.37	3.13	3.09	3.04	3.13	3.14	3.12	3.08	2.75	2.74	2.42	2.58	2.78	2.58	2.52		
		AXIAL	5.22	5.04	5.71	5.50	5.39	5.80	5.32	6.27	6.23	5.76	5.59	6.01	5.69	7.16	5.19	6.22	7.81	5.73	5.39	5.86	5.65	6.20	5.88	5.68	4.57	5.04	8.73	5.82	5.81	5.51	5.22		
	2	HORIZON	2.48	2.31	2.43	2.24	2.35	2.32	2.30	2.27	2.29	2.27	2.25	2.44	2.42	2.76	3.11	2.66	2.58	2.56	2.56	2.60	2.80	2.82	2.79	2.97	2.66	2.57	2.41	2.44	3.00	2.66	2.60		
		VERTICAL	7.61	7.91	7.90	7.82	8.50	8.15	8.62	8.12	7.33	7.52	7.74	8.80	8.12	9.37	7.33	9.21	8.80	8.20	7.92	8.40	8.01	8.22	8.25	7.81	7.01	7.15	8.00	5.76	5.78	6.04	5.46		
		AXIAL	21.66	20.62	21.89	22.04	22.32	23.54	23.13	24.26	23.89	23.40	22.64	22.67	22.78	22.70	22.90	23.21	23.93	23.80	23.16	23.70	23.89	24.72	24.42	24.10	23.31	23.80	23.91	22.12	23.01	21.85	21.31		
CHUMACERAS	3	HORIZON	3.60	4.22	4.35	4.21	4.09	3.81	3.67	3.78	3.37	3.55	3.20	3.27	3.44	4.17	4.13	3.89	4.07	3.40	3.37	3.51	3.68	3.58	3.62	3.60	3.40	3.34	3.30	3.37	3.49	3.14	3.33		
		PEAKVUE																													0.36	0.33	0.30	0.21	0.22
		VERTICAL	7.40	7.53	7.34	7.81	8.34	8.11	8.23	8.45	7.54	7.55	7.62	7.60	7.99	7.80	6.96	7.75	7.74	7.33	7.24	7.31	7.46	7.38	7.76	7.36	7.15	7.06	6.62	4.73	4.56	4.90	4.51		
		AXIAL	9.68	10.61	10.96	11.11	11.22	9.95	10.20	9.86	9.67	9.52	9.39	9.17	9.07	10.79	10.25	10.57	10.86	10.11	10.10	10.15	10.00	10.09	10.04	9.14	9.34	9.50	10.33	10.95	11.30	10.08	10.22		
		HORIZON	8.45	8.38	8.81	9.05	10.04	9.16	9.45	9.32	9.01	9.06	8.69	9.18	8.78	10.33	9.38	10.03	10.17	8.85	9.28	9.42	8.66	8.97	9.13	9.81	9.38	8.08	7.71	6.29	6.86	6.44	6.09		
		PEAKVUE																																	
	4	HORIZON	6.33	6.22	6.53	6.31	6.13	6.01	6.49	6.05	6.01	5.91	6.07	5.77	5.88	5.91	6.42	5.82	6.14	5.55	5.47	5.65	5.47	5.51	5.45	5.80	5.33	5.56	5.12	4.63	4.58	4.45	4.52		
		VERTICAL	6.33	6.22	6.53	6.31	6.13	6.01	6.49	6.05	6.01	5.91	6.07	5.77	5.88	5.91	6.42	5.82	6.14	5.55	5.47	5.65	5.47	5.51	5.45	5.80	5.33	5.56	5.12	4.63	4.58	4.45	4.52		
		AXIAL	7.17	7.16	7.40	8.01	7.41	7.12	7.01	7.04	6.61	6.28	6.30	6.10	6.02	7.00	6.08	6.70	6.50	5.95	5.86	5.80	5.99	5.91	5.97	5.44	5.56	5.52	5.37	4.72	4.52	4.77	4.50		
		HORIZON	3.58	3.43	3.59	3.53	3.62	3.69	3.12	3.17	3.64	4.10	3.83	3.43	3.91	3.64	3.70	2.97	3.53	3.67	3.56	3.32	5.36	4.86	4.41										
		PEAKVUE	0.26	0.25	0.24	0.24	2.24	0.18	0.29	0.21	0.25	0.21	0.22	0.35	0.34	0.29	0.27	0.25	0.38	0.32	0.35	0.24	0.38	0.25	0.25										
		VERTICAL	5.37	5.09	5.38	5.08	5.31	5.51	5.44	4.97	5.49	5.86	5.43	6.04	5.77	5.81	5.46	5.36	5.40	5.48	5.55	5.38	5.44	3.54	3.97										
4	HORIZON	10.43	10.60	10.21	10.38	10.37	10.06	9.57	8.19	9.10	9.25	9.13	9.32	9.21	8.90	9.19	8.15	8.84	8.94	8.24	8.28	9.42	9.30	8.82											
	HORIZON	6.92	6.87	6.45	6.87	6.56	6.35	6.78	5.64	6.38	6.70	6.22	6.40	6.60	6.12	6.21	6.02	5.80	5.75	5.68	5.36	6.27	5.09	2.66											
	PEAKVUE	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03												
	VERTICAL	5.00	5.02	5.03	5.11	5.13	5.07	4.14	4.10	4.22	4.30	4.24	4.17	4.13	4.23	3.34	4.10	4.25	4.13	4.11	4.02	3.97	4.72	6.89											
	AXIAL	4.85	4.52	4.56	4.59	4.78	4.65	3.89	3.45	4.06	4.24	4.01	4.09	3.89	3.98	3.78	3.57	3.96	3.74	3.76	3.69	3.63	2.57	2.65											

VALORES GLOBALES DE VIBRACIÓN MM/SG RMS																											
COMPONENTE	PUNTOS	POSICIÓN	6-Oct	7-Oct	8-Oct	9-Oct	10-Oct	11-Oct	12-Oct	13-Oct	14-Oct	15-Oct	16-Oct	17-Oct	18-Oct	19-Oct	20-Oct	21-Oct	22-Oct	23-Oct	24-Oct	25-Oct	26-Oct	27-Oct	28-Oct		
MOTOR	1	HORIZON	3.79	4.17	3.88	3.94	3.92	3.78	3.62	2.93	3.35	3.78	3.65	3.11	3.15	3.19	3.19	2.65	3.10	3.23	3.45	2.91	5.10	5.13	2.80		
		VERTICAL	2.54	2.89	3.15	3.29	3.16	3.17	2.96	2.46	2.89	3.18	3.14	2.63	2.83	2.66	3.02	2.83	2.50	2.58	2.65	2.44	2.31	1.78	1.79		
		AXIAL	5.78	6.10	6.12	6.07	6.23	6.22	8.09	7.00	7.37	7.48	7.33	7.94	7.85	7.55	7.24	6.26	8.22	8.18	8.14	7.63	8.19	7.20	4.51		
	2	HORIZON	2.84	3.14	3.04	3.11	3.04	2.86	2.67	2.42	2.62	2.88	2.85	2.50	2.73	2.70	2.86	1.95	2.70	2.60	2.75	2.95	3.11	3.87	2.64		
		VERTICAL	6.45	6.45	6.58	6.73	6.58	6.67	7.21	6.70	6.75	7.29	6.83	7.31	7.30	7.04	6.92	6.53	6.89	6.98	6.55	6.75	6.63	4.60	3.03		
		AXIAL	22.92	23.22	23.47	23.70	23.65	23.69	23.66	23.35	24.19	24.06	23.72	23.96	24.44	23.26	23.23	22.39	23.76	24.14	23.98	23.26	23.47	19.98	16.47		
CHUMACERAS	3	HORIZON	3.58	3.43	3.59	3.53	3.62	3.69	3.12	3.17	3.64	4.10	3.83	3.43	3.91	3.64	3.70	2.97	3.53	3.67	3.56	3.32	5.36	4.86	4.41		
		PEAKVUE	0.26	0.25	0.24	0.24	2.24	0.18	0.29	0.21	0.25	0.21	0.22	0.35	0.34	0.29	0.27	0.25	0.38	0.32	0.35	0.24	0.38	0.25	0.25		
		VERTICAL	5.37	5.09	5.38	5.08	5.31	5.51	5.44	4.97	5.49	5.86	5.43	6.04	5.77	5.81	5.46	5.36	5.40	5.48	5.55	5.38	5.44	3.54	3.97		
	4	HORIZON	10.43	10.60	10.21	10.38	10.37	10.06	9.57	8.19	9.10	9.25	9.13	9.32	9.21	8.90	9.19	8.15	8.84	8.94	8.24	8.28	9.42	9.30	8.82		
		HORIZON	6.92	6.87	6.45	6.87	6.56	6.35	6.78	5.64	6.38	6.70	6.22	6.40	6.60	6.12	6.21	6.02	5.80	5.75	5.68	5.36	6.27	5.09	2.66		
		PEAKVUE	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03			
4	VERTICAL	5.00	5.02	5.03	5.11	5.13	5.07	4.14	4.10	4.22	4.30	4.24	4.17	4.13	4.23	3.34	4.10	4.25	4.13	4.11	4.02	3.97	4.72	6.89			
	AXIAL	4.85	4.52	4.56	4.59	4.78	4.65	3.89	3.45	4.06	4.24	4.01	4.09	3.89	3.98	3.78	3.57	3.96	3.74	3.76	3.69	3.63	2.57	2.65			



Calle Madrid 148 3er piso Urb. Mayorazgo Ate – Lima
 ventas@predictivototal.com.pe – servicios@predictivototal.com.pe
 www.predictivototal.com.pe
 (511) Cel.: 015037668 / 997954036

VALORES GLOBALES DE VIBRACIÓN MM/SG RMS														
COMPONENTE	PUNTOS	POSICIÓN	29/10/2021 (11:06 AM)	29/10/2021 (12:23 PM)	29/10/2021 1 (23:01PM)	29/10/2021 (23:48 PM)	30/10/2021 1 (07:53 AM)	31/10/2021 (10:20 AM)	01/11/2021 (10:00 AM)	02/11/2021 (07:42 AM)	03/11/2021 (08:10 AM)	04/11/2021 (07:39 AM)	05/11/2021 (08:00 AM)	
MOTOR	1	HORIZON	2.70	3.90	1.98	2.35	2.89	2.76	2.41	2.48	2.36	2.44	2.59	
		VERTICAL	2.74	3.36	2.16	2.02	1.80	1.81	1.82	1.62	1.69	1.82	1.65	
		AXIAL	13.30	7.47	8.06	7.60	5.22	5.55	6.35	6.26	6.44	6.51	6.65	
	2	HORIZON	2.28	2.78	1.80	1.25	1.54	1.26	1.19	1.35	1.35	1.31	1.30	1.39
		VERTICAL	3.78	4.51	4.55	6.19	5.83	5.20	5.83	5.36	5.36	5.56	5.79	5.56
		AXIAL	22.26	21.21	20.51	21.50	21.25	20.99	21.13	19.99	20.29	20.29	21.33	21.97
CHUMACERAS	3	HORIZON	4.60	3.19	2.34	2.59	3.67	3.46	3.16	3.42	3.31	3.46	2.82	
		PEAKVUE	0.27	0.03	0.03	0.11	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	
		VERTICAL	6.83	5.13	3.73	2.73	5.11	4.63	4.73	4.38	4.38	4.57	4.90	4.65
		AXIAL	6.87	8.13	3.65	5.11	5.89	6.27	6.13	5.69	5.69	5.71	5.36	5.33
	4	HORIZON	8.64	6.90	4.01	4.32	6.23	5.88	5.00	5.13	5.13	4.81	4.72	4.45
		PEAKVUE	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
		VERTICAL	10.26	6.90	4.20	3.87	3.86	3.70	3.42	3.42	3.22	3.37	3.43	3.57
		AXIAL	3.30	3.45										

Anexo 10: Cascadas de los puntos de sensado

