

# Mantenimiento predictivo mediante monitoreo a distancia en palas electromecánicas de minería chilena

Sebastián Yáñez-Sepúlveda<sup>1</sup>, Sebastián Martel-Moscoso<sup>2</sup>, Ignacio Tomasov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. [syanez2017@udec.cl](mailto:syanez2017@udec.cl)

<sup>2</sup>Monitoreo y Análisis, Gerencia de Integridad Mecánica, CADETECH S.A., Chile. [smartel@cadetech.cl](mailto:smartel@cadetech.cl)

<sup>3</sup>Desarrollo y Operaciones, Gerencia de Integridad Mecánica, CADETECH S.A., Chile. [itomasov@cadetech.cl](mailto:itomasov@cadetech.cl)

## Resumen

Las palas electromecánicas son consideradas como un equipo crítico de la minería. Son equipos de alto valor y complejidad, para los cuales las estrategias de mantenimiento reactivo y preventivo implican pérdidas mayores de producción y costos. Las características propias de su funcionamiento dificultan la aplicación de estrategias predictivas convencionales basadas en análisis de vibraciones. En el presente trabajo se demuestra como la implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones en línea y continuo es una estrategia óptima de mantenimiento predictivo, que permite aumentar la disponibilidad y la producción de palas electromecánicas. Para ello, se implementó el Sistema Avanzado de Monitoreo Flexible (SiAMFlex) para palas, el cual usa un algoritmo de Order-Tracking (OT) para procesar vibraciones. Esto permite el seguimiento de indicadores frecuenciales en las transmisiones de Giro, Levante y Empuje. Los resultados demuestran que es posible detectar fallas en engranajes, rodamientos y problemas como desbalances, desalineamientos y solturas.

**Palabras clave:** Equipo crítico; Monitoreo de condición; Order Tracking; Diagnóstico de fallas mecánicas.

## Abstract

Electromechanical shovels are considered critical mining equipment. They are high-value and complex equipment, for which reactive and preventive maintenance strategies imply greater production and cost losses. The characteristics of its operation make it difficult to apply conventional predictive strategies based on vibration analysis. This work seeks to demonstrate that the implementation of an online and continuous vibration monitoring system is an optimal predictive maintenance strategy, which can increase the availability and production of electromechanical shovels. The Advanced Flexible Monitoring System (SiAMFlex) for shovels is implemented, which uses an Order-Tracking (OT) algorithm to process vibrations signals. This allows the monitoring of frequency indicators in the Swing, Hoist and Crowd transmissions. The results show that it is possible to detect failures in gears, bearings and problems such as unbalance, misalignment and mechanical looseness.

**Keywords:** Critical equipment; Condition monitoring; Order Tracking; mechanical failures diagnosis.

## 1. Introducción

La minería es uno de los principales sectores económicos de Chile, con una contribución al producto interno bruto (PIB) que alcanzó un aporte del 14,6% en 2021. Ese mismo año, los ingresos provenientes de la tributación de la minería privada representó el 18,9% del total de los ingresos fiscales [1]. En la industria, la reducción de costos y eficiencia de los procesos es un objetivo primordial. En este contexto, en 2001 se llevó

a cabo un estudio comparativo de mantenimiento de seis minas de cobre a cielo abierto, responsables colectivamente del 58% de la producción de cobre de Chile. Se encontró que el mantenimiento era responsable del 44% de los costos de producción de la mina. Concluyeron que la disponibilidad de la flota y los costos de mantenimiento en las operaciones a cielo abierto chilenas podrían mejorarse considerablemente mejorando y/o desarrollando estándares de planificación del mantenimiento [2]. En cuanto a la

distribución de gastos y magnitud de los costos, en la Figura 1 se observa los costos de superintendencia de una mina superficial de gran escala, aquí, los gastos más importantes recaen en el área de mantención, seguido de la superintendencia de carguío y transporte, donde ambas áreas tienen una estrecha relación [3].

Uno de los equipos más importantes en este rubro son las palas electromecánicas [4], cuyo esquema se ve en la Figura 2, estas se encargan de la extracción de los minerales, pudiendo cargar hasta 120 toneladas en un solo balde. Son consideradas un equipo crítico debido a que su detención no planificada detiene la extracción, lo que trae consigo una interrupción o disminución en toda la producción. En consecuencia, se requiere de una estrategia eficaz y eficiente para optimizar las tareas de mantenimiento predictivo en las palas. Un estudio realizado en una mina a cielo abierto de cobre de Chile, para una flota de 15 palas, señala que al implementar medidas que logren disminuir en un 25% las horas asociadas a las mantenciones no programadas, puede llegar a aumentar la disponibilidad en un 6%, lo que implicaría un aumento total de la producción de hasta un 22% [5]. En este contexto, la mantención de los equipos sigue siendo estudiada para encontrar métodos certeros de predicción y equilibrio entre mantenciones planificadas y no planificadas.

El problema principal en la aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo en estos equipos radica en que, a diferencia de la gran mayoría de las máquinas rotatorias, las palas tienen un funcionamiento particular, con ejes que trabajan a muy bajas velocidades, ciclos de trabajo de pocos segundos de duración, sumado a una velocidad, sentido de giro y carga variable. Como consecuencia de esto, mediciones contiguas con distintos sentidos de giro pueden llegar a tener amplitudes muy diferentes, dado que mientras en un sentido el equipo mantiene la carga suspendida, en el otro opera en vacío. Similar es lo que sucede con 2 mediciones continuas, que, debido a la variabilidad existente entre cada operación de carguío se pueden inducir diferentes características en las fuerzas dinámicas y por ende, variaciones en el comportamiento vibratorio. Por otro lado, los cambios en la velocidad impiden identificar componentes específicas en el dominio frecuencia dada la dispersión de energía propia de la variación de una componente en el tiempo. Todas estas condiciones de operación variables dificultan la implementación del análisis de vibraciones para aplicar mantenimiento predictivo y son el foco del presente estudio.

En las palas mineras se suele implementar planes de mantenciones programados de acuerdo con horas efectivas de uso y la realización de un monitoreo de condiciones en terreno para pronosticar problemas y, preparar repuestos a tiempo para maximizar los

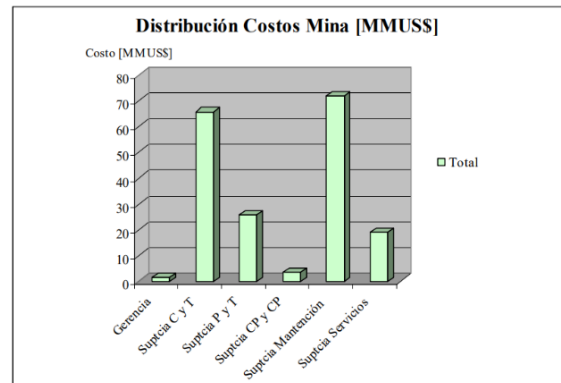


Figura 1. Distribución de costos por superintendencia en mina a cielo abierto (Fuente: [3]).

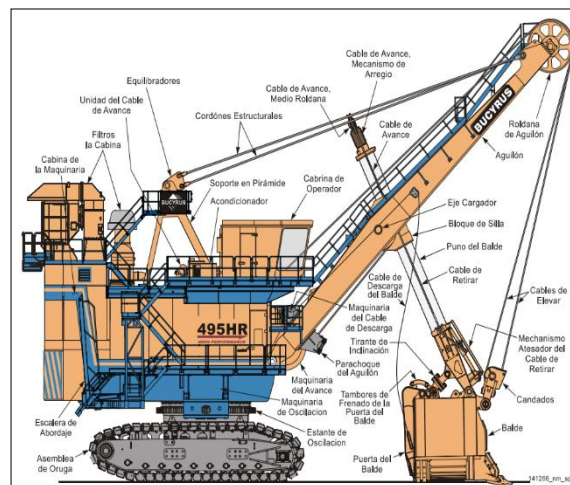


Figura 2. Esquema de pala electromecánica Bucyrus 495HR (Fuente: [4]).

tiempos de operación. Una de las técnicas utilizadas para el problema de velocidad variable es realizar las mediciones con velocidad constante. Aquí, se busca disminuir la velocidad de rotación programada y generar tramos de velocidad más o menos constantes, que en contra partida, genera ciclos de trabajo súbitos propios de los cambios drásticos de aceleración [6]. En cuanto a las cargas, para poder realizar mediciones a igual carga, se debe medir con el balde vacío [6].

Las principales deficiencias de esto es que las mediciones no se realizan en condiciones reales de operación, lo que, sumado a la detención de la producción, necesaria para realizar la medición, y el riesgo al que se expone el personal encargado de efectuar la tarea limita la capacidad de detección de esta estrategia [7]. Ante esto, los últimos estudios analizan la viabilidad del montaje de un sistema de monitoreo de vibraciones permanente en la pala que opere automáticamente, recopilando información mientras la pala está en funcionamiento. Si bien la aplicación de nuevas técnicas complejas implica una mayor inversión, estos costos pueden llegar a ser recuperados cuando se evita la primera hora de una detención o tiempo de inactividad no planificado [8].

Para sopesar estas dificultades, en este trabajo se describe y demuestra como un sistema de monitoreo continuo basado en vibraciones mecánicas, junto al registro histórico de niveles vibratorios y la evolución de estos, es capaz de detectar a tiempo condiciones anormales de funcionamiento en palas al presentarse variaciones significativas en el comportamiento de las señales. La detección de estas variaciones junto al análisis efectuado por un especialista, permiten diagnosticar la condición mecánica de los equipos, determinar fallas específicas y planificar las acciones y cambios necesarios, sin detener el equipo y por ende, aumentando la disponibilidad y producción.

## 2. Métodos

### 2.1. Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones dentro del mantenimiento predictivo ha sido ampliamente estudiado en la industria [9]. Las vibraciones se generan producto de fuerzas dinámicas que actúan sobre los equipos, la forma, frecuencia y magnitud de la vibración actúan como síntomas para diagnosticar la condición mecánica de estos. Algunos problemas y sus síntomas vibracionales básicos considerados en este estudio son:

- **Desbalanceo:** hay una componente predominante a la velocidad de rotación del motor o  $1xRPM$  ( $1x$ ) como se ve en la Figura 3. Las no-linealidades generan, además, pequeñas componentes a  $2x$ ,  $3x$  (bajo el 5% del  $1x$ ). La forma de onda es sinusoidal con amplitud aproximadamente constante [9].
- **Desalineamientos:** presenta componentes a  $1x$ ,  $2x$  y  $3x$  predominantes visibles en la Figura 3. Si el desalineamiento es severo, genera mayor cantidad de armónicos a  $4x$ ,  $5x$ , o más. La forma de onda es repetitiva en cada periodo de rotación [9].
- **Solturas Mecánicas:** en la Figura 3 se presentan los síntomas típicos, gran cantidad de armónicos de RPM o algunas veces a  $RPM/2$ . A mayor grado de solturas, mayor cantidad de armónicos [9].
- **Engranajes:** la vibración inherente al trabajo de engranajes son los múltiplos de la frecuencia de engrane,  $F_e$  (contacto entre los dientes). Cuando el daño es en solo 1 diente, causa bandas laterales a distancia de  $1x$  alrededor  $F_e$  y sus armónicos. La excentricidad del engrane genera una banda lateral a cada lado de  $F_e$  distanciada a las RPM del engrane [9] visibles en la Figura 4.
- **Daño en rodamientos:** Cuando existe una falla, se ven 4 tipos de frecuencias, BPFI (frecuencia de falla en la pista interna), BPFO (frecuencia de falla en la pista externa), FTF (frecuencia de falla en el canastillo) BSF (frecuencia de falla en los elementos rodantes) presentadas en la Figura 5, de lo contrario no debería haber signos de estas [9].

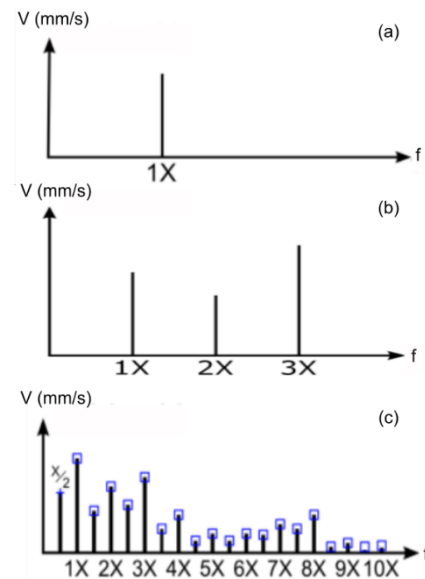


Figura 3. Espectros generales de (a) rotor desbalanceado, (b) desalineamiento y (c) equipo con solturas mecánicas.

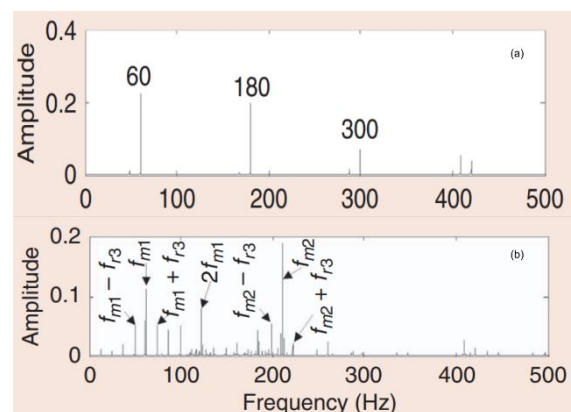


Figura 4. Espectro de (a) engrane normal y (b) diente roto,  $f_m$  frecuencia de engrane y  $f_r$  de rotación (Fuente:[13]).

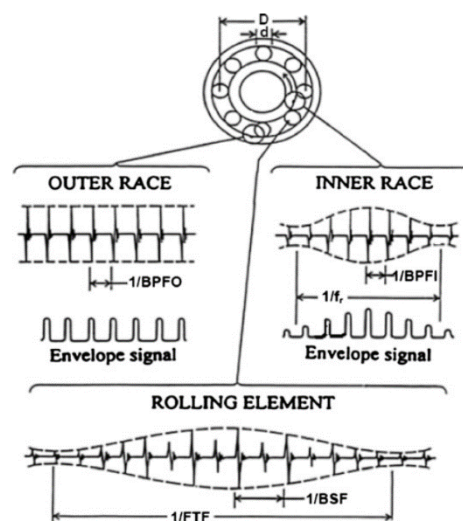


Figura 5. Señales típicas de fallas locales en rodamientos (Fuente:[14]).

## 2.2. Medición en palas mineras

En el presente estudio, se aplica un monitoreo de condición a la pala electromecánica modelo Bucyrus 495 HR [4], cuyo esquema fue presentado en la Figura 2. En ella, es posible reconocer 3 componentes vitales encargados de dirigir los movimientos del balde: conjunto de Empuje (Crowd), conjunto de Levante (Hoist) y conjunto de Giro (Swing). El motor, típicamente de tipo Jaula de Ardilla, opera a una velocidad variable entre las 0 y 1490 RPM en función de la frecuencia suministrada por el convertidor. En cuanto a las transmisiones, aunque presentan características dispares, en general se conforman por múltiples reducciones con distintas frecuencias de engrane, mencionadas en la Tabla 1.

**Tabla 1. Reducciones de las transmisiones en pala Bucyrus 495 HR.**

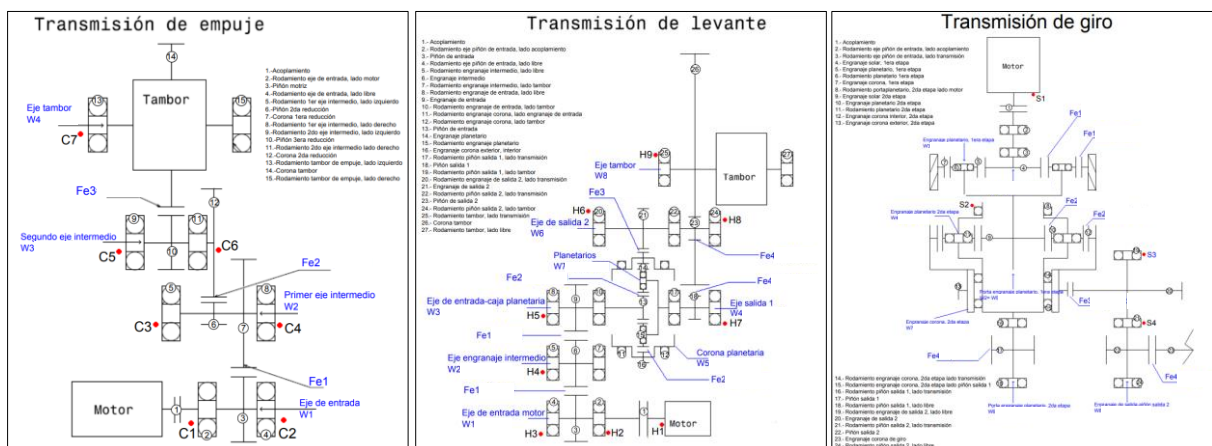
Transmisión	Frecuencias de engrane
Empuje	Fe1: Piñón-Corona 1ª reducción.
	Fe2: Piñón-Corona 2ª reducción.
	Fe3: Piñón-Corona 3ª reducción.
Levante	Fe1: Engranaje eje de entrada-eje intermedio- entrada caja planetaria.
	Fe2: Eje solar- engranaje planetario.
	Fe3: Carcasa epicicoidal planetaria-corona de salida.
	Fe4: Piñón eje Salida 1-piñón eje salida-corona tambor.
Giro	Fe1: Engranaje Solar-Planetario-corona de planetario 1ª etapa.
	Fe2: Engranaje Solar-Planetario-corona de planetario 2ª etapa.
	Fe3: Engrane salida-corona 2ª etapa.
	Fe4: Piñón salida-corona de giro.

Fuente: elaboración propia.

## 2.3. Sistema de monitoreo

En búsqueda de detectar de forma efectiva desperfectos mecánicos, se implementó el sistema de monitoreo de vibraciones SiAMFlex [10] a 7 palas y se mantuvo un registro histórico durante 2 años. Se adquirieron, junto a las señales de vibración, registros de la velocidad de operación. Los datos vibratorios obtenidos fueron procesados en conjunto con la velocidad de operación a través de un algoritmo de Order-Tracking. Como consecuencia, el dominio espectral típico de trabajo es remplazado, pasando de un análisis tiempo-frecuencia a un análisis revolución-order [11]. Se ha demostrado que el método puede aplicarse como una herramienta eficaz para realizar el monitoreo de condición en las palas mientras están trabajando [12]. De esta forma, se realiza el análisis espectral mediante espectros amplitud vs order, lo que facilita el seguimiento de indicadores frecuenciales asociados a las distintas reducciones, ejes y rodamientos de cada transmisión específica, sin importar la velocidad operación.

La correcta definición del sistema de monitoreo requiere tener en consideración las características del componente a monitorear y el tipo de fallas al que puede estar expuesto. Cada conjunto posee múltiples elementos que pueden verse afectados por diversos tipos de fallas que incluyen las mencionadas en el capítulo 2.1, entre otras. En consecuencia, el sistema debe tener la robustez suficiente para identificar problemas mecánicos en todo el conjunto, incluso si existe pérdida de comunicación con algún sensor en particular. Para ello, el sistema SiAMFlex contempla un total de 24 puntos de medición los cuales se presentan en la Figura 6. En cada uno de estos puntos de medición se instalan acelerómetros, 7 para el conjunto de Empuje (denotados como los sensores C#), 9 para conjunto Levante (H#) y 4 para cada conjunto de Giro (S#).



**Figura 6. Esquemas de transmisiones Empuje, Levante y Giro en palas Bucyrus 495 HR. Fuente: elaboración propia.**



## 2.4. Detección de alertas vibratorias

Bajo el paradigma típico de análisis, cada dato debe ser revisado directamente por un analista de vibraciones, pero, en un escenario de múltiples equipos, se requiere de herramientas que ayuden a priorizar los datos a analizar y darle énfasis a la detección de fallas. Para ello, se define como “alerta vibratoria” a un evento de datos que requiere ser analizado por un analista de vibraciones. Las alertas consideradas en este estudio son detectadas con las siguientes estrategias:

- Superación de umbrales estáticos: alertas determinadas por si los datos adquiridos, o una representación de ellos superan un límite previamente definido. Esta es una estrategia simple, pero implica reconfigurar continuamente los umbrales configurados.
- Detección de eventos abruptos: son alertas determinadas por la naturaleza estadística de un nuevo dato respecto a su historial. Identifica nuevos datos que están muy por encima de la distribución de datos pasados. Es de simple configuración y fácil de extender a varios tipos de máquinas, no obstante, no es útil si no se cuenta con un historial de mediciones. Útil en la detección de fallas de evolución rápida, tales como soldadura de pernos de anclaje y fallas de acoplamientos.
- Detección de eventos evolución gradual: son alertas dadas por un crecimiento de amplitudes y tendencias lento pero persistente en el tiempo. Esta estrategia es de configuración simple y extensible a varios tipos de máquinas. Útil para la detección de desbalanceamientos y daños en rodamientos.

Cabe destacar que una correcta configuración de alertas automáticas es un aspecto fundamental en el proceso de análisis de vibraciones y una pieza clave en la entrega de valor de los sistemas de monitoreo. Los datos adquiridos pueden ser representados como valores globales o, conocidas cada una de las componentes, pueden ser representados como tendencias vibratorias asociadas a seguimientos específicos designados para detectar fallas específicas. Algunos seguimientos que se puede configurar son:

- Peak FO: Aumentos en la tendencia Peak indican la aparición de impactos.
- RMS: Permite visualizar si agravan las fallas cuando esta va en aumento.
- Fe: asociado a las distintas frecuencias de engrane y la sumatoria de sus armónicos.
- Rodamientos: Seguimiento del valor vibratorio asociado a las distintas fallas de los rodamientos (BPFI, BPFO, FTF y 2XBSF).
- W: Seguimiento vibratorio asociado a la velocidad de trabajo de los motores, ejes y también a la sumatoria de armónicos de estas.

## 3. Resultados

Si bien, los síntomas vibratorios entregan indicios del comportamiento mecánico, como se menciona en párrafos anteriores, las mediciones puntuales no son suficientes para diagnosticar la condición mecánica del equipo ni mucho menos el tiempo de vida restante. A continuación, se demuestra como el sistema SiAMFlex, mediante el análisis de tendencias a lo largo del tiempo y el análisis comparativo, en conjunto con el trabajo de personal capacitado en el entendimiento de señales vibratorias y la retroalimentación constante con el personal encargado de las tareas de mantenimiento, permiten la detección oportuna de diversos tipos de fallas, algunas de los cuales se describen a continuación.

### 3.1. Falla en engranajes

#### 3.1.1. Fractura diente Corona de segundo eje intermedio en transmisión Empuje

En este caso, se detecta el alza en la tendencia Peak de la transmisión Empuje, generándose una alerta. Un análisis exhaustivo de la forma de onda muestra la presencia de impactos a la velocidad de giro del segundo eje intermedio, como se muestra en la Figura 7. En el espectro, se observa la presencia predominante de componentes a Fe2 y sus armónicos, sin embargo, históricamente se han observado como componentes propias del funcionamiento. Acá, la posibilidad de tener datos simultáneos y evaluar su evolución en el tiempo permite determinar en qué punto es mayor la magnitud de los impactos y si es un fenómeno que se de forma habitual en el resto de los equipos monitoreados. Los síntomas detectados son indicativos de una falla de un diente de la corona y, el seguimiento de su evolución en el tiempo permite tener noción de cómo ha evolucionado y cuál es su severidad. En la Figura 8, se ve que el alza en los valores Peak se presentó por un periodo superior a 1 mes, donde la ejecución de inspecciones en terreno confirma el diagnóstico. Luego, posterior al cambio los valores disminuyen hasta niveles típicos del componente.

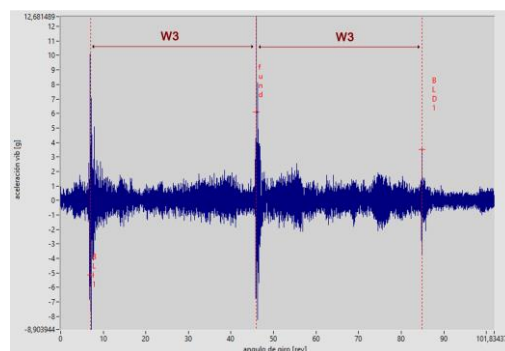


Figura 7. Impactos periódicos asociados a daño en 1 diente.

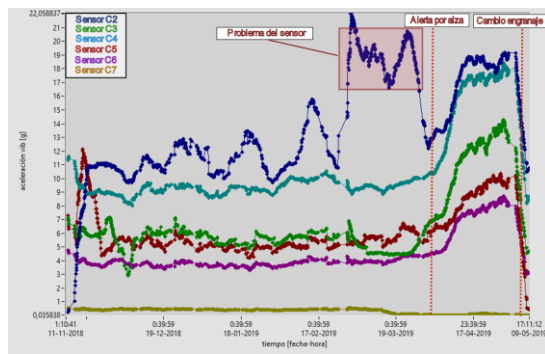


Figura 8. Tendencia Peak en los sensores de la transmisión de Empuje en presencia de falla en diente de corona.

### 3.1.2. Daño en dientes eje solar transmisión Levante

La transmisión Levante cuenta con múltiples etapas de reducción, las cuales incluyen un engranaje planetario. Cuando se desarrolla un desgaste en los dientes del eje solar, es posible visualizar armónicos característicos del engrane en los espectros de la Figura 9. Al mantener el seguimiento con múltiples sensores en la transmisión, es posible detectar un alza en la tendencia del indicador  $3x(W3-W4)$ , frecuencia de paso de los planetas, en los sensores H4, H5 y H6, ubicados en zonas óptimas para detectar estos síntomas. En la Figura 10 se ve como la notificación oportuna permite nuevamente la planificación estratégica del cambio de componente que se realiza al cabo de un mes.

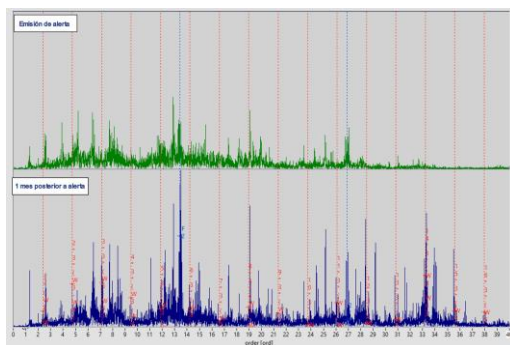


Figura 9. Armónicos asociados a daños en eje solar.

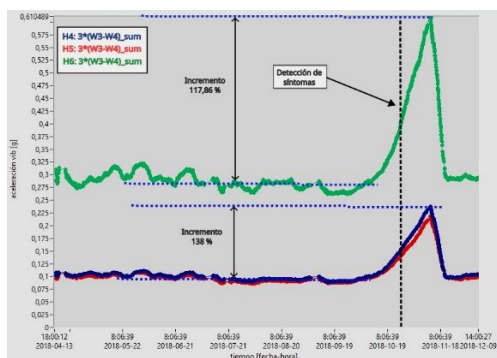


Figura 10. Promedio de la tendencia asociada a los armónicos de engrane del eje solar.

### 3.1.3. Picadura en engranaje Planetario de transmisión Levante

Al interior de la transmisión Levante suelen presentarse fallas en los engranajes planetarios, las cuales pueden desencadenar problemas mayores, como la fractura de un diente que podría producir una falla catastrófica si este se introduce entre otras componentes de la transmisión. Para este tipo de fallas, se designa el seguimiento del indicador W7, correspondiente a la velocidad de giro de los planetas en los puntos más cercanos al elemento de interés, los sensores H5, H7 y H8. De esta forma, se realiza el seguimiento de los niveles vibratorios asociados a las bandas laterales y armónicos a esta velocidad. En la Figura 11, se observa como el seguimiento programado en cada uno de los sensores detectan alzas en las tendencias vibratorias, emitiendo las alertas respectivas. El resultado de estas alertas se comprueba cuando el analista de vibraciones comienza a analizar los espectros, en la Figura 12 se pueden observar los armónicos a la velocidad de giro de los planetas en los sensores H7 y H8. El sistema, programado para mantener el seguimiento de estos síntomas, monitorea con éxito la magnitud vibratoria de los armónicos, los cuales son producto de los impactos a su velocidad de giro, una vez más notificando de forma oportuna y permitiendo planificar acciones correctivas, las cuales fueron ejecutadas a los 3 meses de la detección inicial.

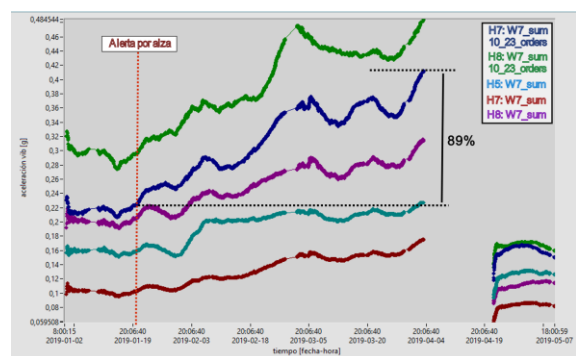


Figura 11. Alza en la tendencia del promedio del seguimiento asociado a armónicos de W7 debido a falla en un diente de engranaje planetario.

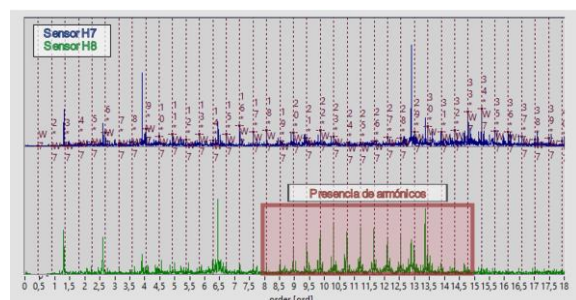


Figura 12. Armónicos de W7 debido a falla en un diente de planetario.

## 3.2. Rodamientos

### 3.2.1. Falla en pista externa de rodamientos, Transmisión Empuje

Ante la aparición de daño en rodamiento del eje de entrada lado libre de la transmisión de Empuje, el sistema detecta un alza en la tendencia Peak en los sensores debido a los impactos. Esta tendencia puede ser síntoma de más de un tipo de falla. Una revisión del espectro vibratorio es fundamental para determinar el origen de esta alza. La Figura 13 muestra la presencia de componentes coincidentes con BPFO en el espectro. El sistema permite realizar el seguimiento a la magnitud vibratoria asociada únicamente a los armónicos de BPFO, diferenciándolo del resto de síntomas presentes y manteniendo un seguimiento específico de las componentes. En la Figura 14 se ve como para la falla, detectada por más de un sensor, se ejecuta un plan de acción estratégico a los 4 meses.

### 3.2.2. Picadura en elementos rodantes de rodamientos eje de entrada, Transmisión Levante

En este caso comienza a notarse un aumento en la tendencia Peak en los sensores de la transmisión. En los espectros se visualizan componentes asociadas a elementos rodantes del rodamiento de eje de entrada, presentados en la Figura 15. Luego, se puede realizar el seguimiento a la vibración asociada a la falla del rodamiento, en la Figura 16 se observa como la tendencia promedio de las componentes a 2xBSF se mantuvo monitoreada mientras iba al alza por 3 meses, fecha en la cual se efectuaron acciones y se realiza el cambio.

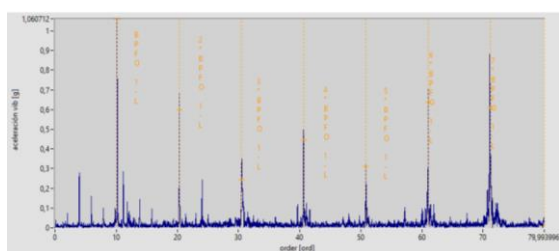


Figura 13. Armónicos de BPFO en espectro OT de sensor C2, transmisión Empuje.

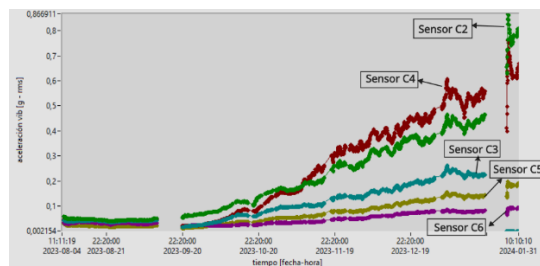


Figura 14. Tendencia promedio en el tiempo de la suma de armónicos de BPFO en sensores transmisión Empuje.

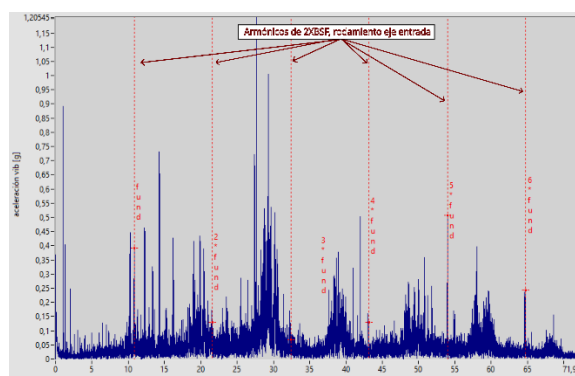


Figura 15. Armónicos de 2xBSF en espectro OT de sensor H5, transmisión Levante.

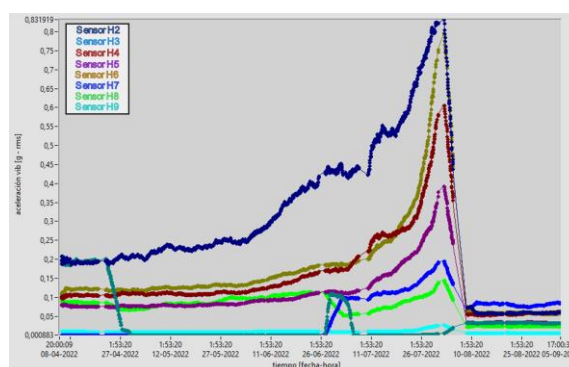


Figura 16. Tendencia promedio en el tiempo de la suma de armónicos de 2xBSF en sensores transmisión Levante.

## 3.3. Motores

### 3.3.1. Desalineamiento en eje cardánico del motor de transmisión Levante

Los desalineamientos son problemas muy comunes, en este caso se estudia un desalineamiento en el eje de entrada de la transmisión Levante. Los síntomas más evidentes son la presencia de armónicos a la velocidad del motor en el espectro de la Figura 17, para este problema, los armónicos son visibles en ambos lados del eje (H1 y H2). Como se muestra en la Figura 18, la aparición de los armónicos es abrupta, aquí, el sistema posibilita dar seguimiento a la tendencia vibratoria posterior al alza, visualizando si esta se mantiene estable o aumenta, lo que permite esperar el momento óptimo para aplicar las acciones correctivas o, en caso de ir en aumento, detener el equipo.

### 3.3.2. Desbalance en motor de la transmisión Giro

Para desbalanceamiento, el seguimiento es realizado sobre la magnitud de la componente a 1x, predominante en el espectro de la Figura 19. En este caso, se tiene desbalance en el motor, cuya componente va al alza en 3 de los 4 sensores de la transmisión Giro



(1 sensor se encuentra con mediciones erróneas). El seguimiento mostrado en la Figura 20 permite detectar como las vibraciones asociadas a esta componente van al alza, obligando a tomar acciones correctivas.

### 3.3.3. Soltura en motor de transmisión levante

Ante solturas en motor, en la Figura 21 se muestra la presencia de armónicos de su velocidad de trabajo, cuyo seguimiento es realizado mediante las tendencias vibratorias. En este caso, además, se presenta un alza en la tendencia Peak, la cual se puede observar en la Figura 22. Este seguimiento y la posibilidad de comparar con mediciones previas permite solicitar inspecciones correspondientes propias al caso.

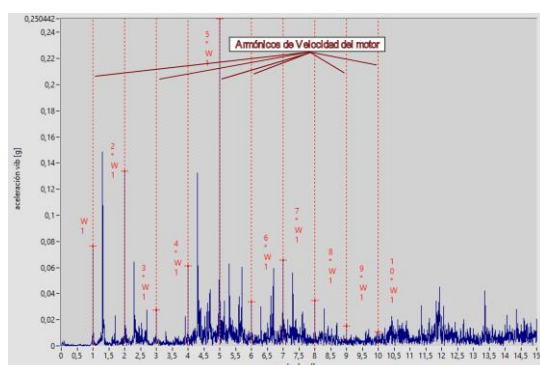


Figura 17. Armónicos a la velocidad del motor en espectro OT, sensor H1 de transmisión Levante por desalineamiento.

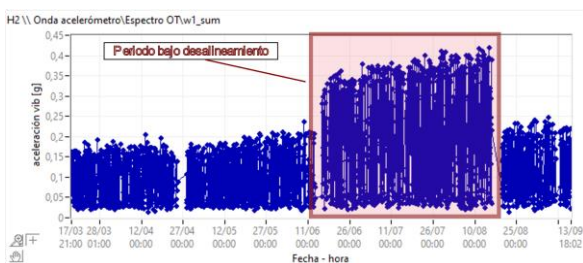


Figura 18. Tendencia en el tiempo de la suma de armónicos de la velocidad del motor en sensor H1, transmisión Levante.

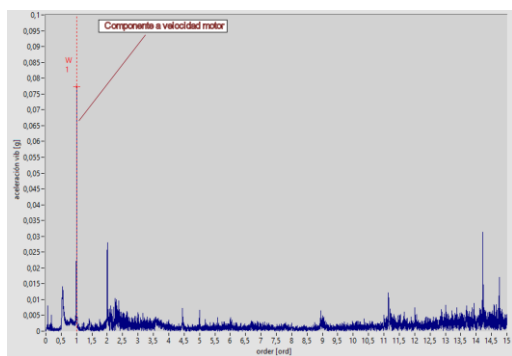


Figura 19. Componente predominante a 1x por desbalance en motor transmisión Giro.

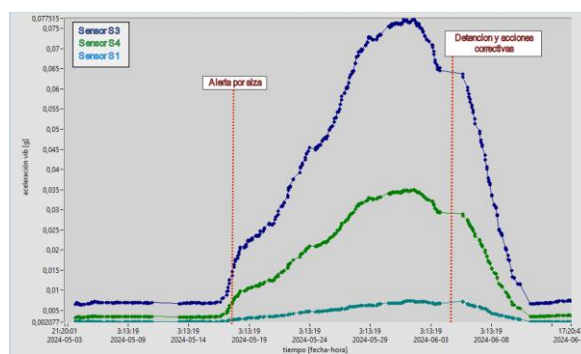


Figura 20. Valor promedio de la magnitud vibratoria asociada a componente 1X en sensores de transmisión Giro.

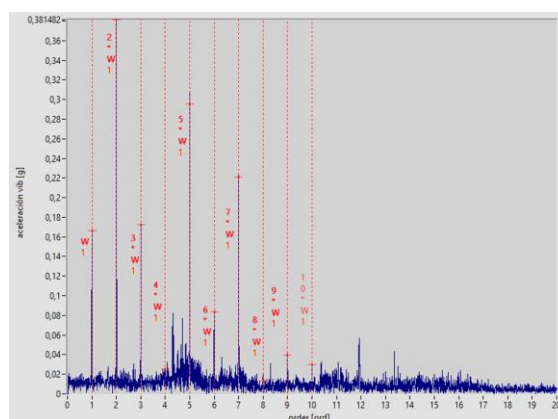


Figura 21. Armónicos en espectro OT sensor H1, producto de soltura en motor de transmisión Levante.

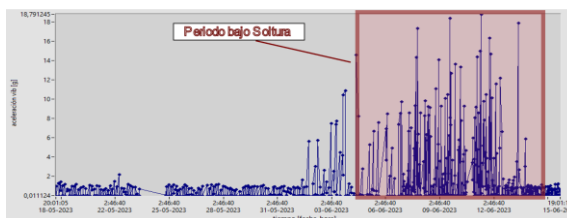


Figura 22. Alza en la tendencia Peak, por soltura en motor de la transmisión Levante.

### 3.4. Solturas y/o pérdida rigidez

#### 3.4.1. Fisuras pernos pedestal de tambor transmisión Levante.

El seguimiento de la tendencia Peak es uno de los indicadores más importantes a la hora de detectar alteraciones vibratorias. Esta entrega la posibilidad de inferir solturas o desperfectos en los pernos de anclaje. En la Figura 23, se puede apreciar un incremento repentino en la tendencia Peak en el sensor H9 de la transmisión Levante, la cual posteriormente se mantuvo estable. Durante ese periodo se pudo observar transientes no periódicos asimétricos de gran amplitud en la forma de onda del sensor H9, mostrada en la Figura 24. La inspección ejecutada en zonas a los



puntos con mayor amplitud permitió identificar que el origen de los impactos era propio de fisuras en los pernos del tambor, ubicado a la salida de la transmisión.

### 3.4.2. Pernos basales transmisión Giro.

Similar al caso anterior, el corte de un perno desencadena un alza abrupta en la tendencia Peak, como se muestra en la Figura 25, las cuales son detectadas por el sistema de alertas. Al cortarse un perno en la base de la transmisión, el funcionamiento del conjunto completo se ve alterado, lo que puede generar la aparición de otros síntomas de fallas. En este caso, la Figura 26 presenta el incremento en las tendencias vibratorias de la última reducción (Fe4) debido a la generación de un engrane excéntrico. Lo que evidencia la necesidad de detener el equipo antes de que se generen fallas de mayor gravedad.

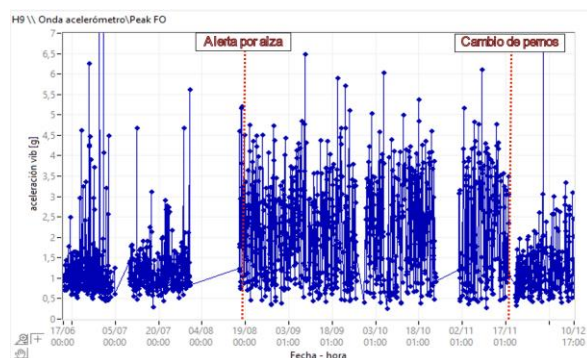


Figura 23. Alza en tendencia Peak por desperfecto en pernos de pedestal del tambor en transmisión Levante.

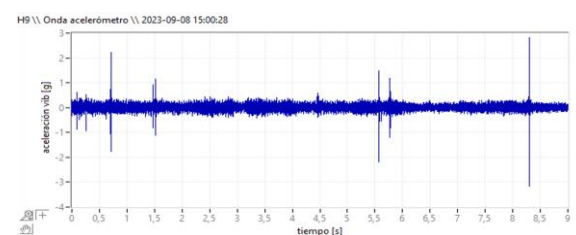


Figura 24. Transientes no periódicos producto del desperfecto en pernos del pedestal del tambor.

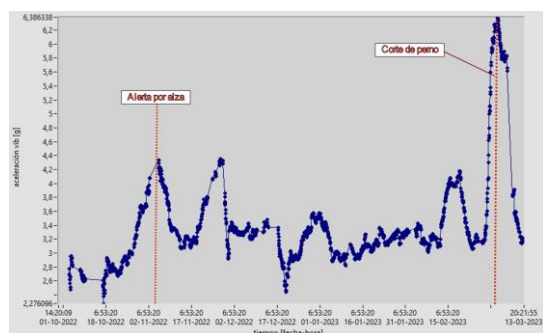


Figura 25. Alza en el promedio de tendencia Peak debido a corte de pernos.

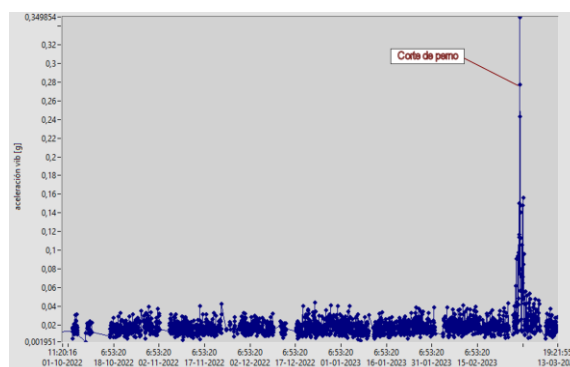


Figura 26. Alza en la tendencia de Fe4 por corte de pernos en transmisión Giro.

## 4. Conclusiones

El sistema SiAMFlex implementado almacena y procesa las mediciones de vibración de las palas electromecánicas, permitiendo su seguimiento durante condiciones reales de operación, lo que hace posible el análisis de las tendencias vibratorias en periodos de meses y hasta de años. Una vez instalado, se monitorea la aparición de condiciones anormales de funcionamiento y la detección de alteraciones, no solo en un equipo, sino que, al instalar el sistema en más de uno, es posible comparar al instante los niveles vibratorios entre ellos.

Los resultados demuestran que mediante el sistema SiAMFlex es posible diagnosticar con efectividad en cada uno de los componentes fallas características como desalineamientos, desbalances, daño en engranajes, rodamientos e imperfecciones en pernos de las transmisiones, las cuales pueden afectar la continuidad operacional de los equipos. El seguimiento de las tendencias históricas vibratorias, sumado a los síntomas teóricos y empíricos observables en más de uno de los sensores ubicados en distintas zonas de la transmisión, aumenta la precisión y eficacia de las acciones de control de amenazas.

Es importante recalcar que el sistema emite las alertas, pero el análisis y diagnóstico final requiere de un analista especializado para poder interpretar esta información. Si bien la inteligencia artificial avanza, aun no se puede permitir que el equipo tome una decisión que implique detener una máquina sin tener a un especialista humano al tanto. El trabajo en conjunto permite la detección oportuna de fallas mecánicas.

Se demuestra la ventaja que otorga el sistema al permitir que los síntomas puedan ser detectados con meses de anticipación a la fecha donde es estrictamente necesario el cambio del componente. Este diagnóstico a tiempo permite planificar la toma de acciones, aumentando la disponibilidad y producción, pero de la

misma forma, permite evitar fallas catastróficas con la detención de los equipos a tiempo cuando se visualizan alzas considerables en la magnitud de las vibraciones.

Es importante considerar que el análisis de vibraciones corresponde a solo una parte de la metodología para un mantenimiento predictivo adecuado. Este, además, debe incluir técnicas como el análisis de aceite, termografía infrarroja, detección de ultrasonido u otra técnica de medición de ondas de alta frecuencia y análisis de corriente, las cuales, en conjunto con el análisis de vibraciones, permiten realizar un mantenimiento predictivo óptimo y eventualmente mejorar la eficiencia en los procesos de mina.

## Referencias

- [1] Dirección de Estudios y Políticas Públicas, “Informe: Análisis del Impacto socioeconómico de la actividad minera a nivel regional,” 2022.
- [2] Oyanader. Knights, P. F. and P., “Best-in-class maintenance benchmarks in Chilean open pit mines,” *The CIM Bulletin*, vol. 98, no. July, 2005.
- [3] M. López, “Análisis y gestión de costos en explotación minera a cielo abierto” Universidad de Chile, Santiago, 2008.
- [4] Bucyrus, “495 HR. Pala para minería. Manual de mantención & operación.”
- [5] F. Tapia, “Impacto de la disponibilidad en equipos mineros de carguío y transporte ligado a sus motivos de detención,” Universidad de Concepción, 2018.
- [6] P. Saavedra and C. Román, “Mantenimiento predictivo en palas electromecánicas de la minería,” 2000.
- [7] M. Riquelme, “Proyecto en monitoreo de condiciones para mantenimiento predictivo de palas electromecánicas,” Universidad de Chile, 2013.
- [8] D. Nower, “Online Vibration Monitoring on Electric Mining Shovels,” *MaintWorld*, May 2013.
- [9] G. White, “Introducción al análisis de vibraciones,” *Azima Dli*, vol. 300, p. 40, 2010.
- [10] CADETECH, homepage.
- [11] K. R. Fyfe and E. D. S. Munck, “ANALYSIS OF COMPUTED ORDER TRACKING,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 11, no. 2, pp. 187–205, 1997, doi: <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0056>.
- [12] P. N. Saavedra and C. G. Rodriguez, “Accurate assessment of computed order tracking,” *Shock and Vibration*, vol. 13, no. 1, 2006, doi: 10.1155/2006/838097.
- [13] X. Jin, F. Cheng, Y. Peng, W. Qiao, and L. Qu, “Drivetrain gearbox fault diagnosis: Vibration-and current-based approaches,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 24, no. 6, 2018, doi: 10.1109/MIAS.2017.2740470.
- [14] R. B. Randall and J. Antoni, “Rolling element bearing diagnostics-A tutorial,” 2011. doi: 10.1016/j.ymssp.2010.07.017.