

# **Mantenimiento Basado En Condición En Minería: Detección Temprana De Falla En Rodamiento Mediante Técnicas Predictivas Integradas**

**César Moreno Ayala**

Superintendencia Ingeniería de Mantenimiento, Aris Mining Segovia,

Antioquia - Colombia

[cesar.moreno@aris-mining.co](mailto:cesar.moreno@aris-mining.co)

[www.aris-mining.com](http://www.aris-mining.com)

## **Resumen**

La implementación del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) en la planta de beneficio de Aris Mining permitió detectar tempranamente una falla incipiente en el rodamiento del sistema motriz del molino de bolas principal. Mediante el análisis integrado de vibraciones, termografía, monitoreo acústico y firma eléctrica, se anticipó la evolución del deterioro y se programó una intervención planificada. Esta acción evitó una falla catastrófica, mejoró la confiabilidad del equipo y generó ahorros significativos. El estudio demuestra el valor del CBM como herramienta efectiva para la gestión de activos críticos en minería.

**Palabras clave:** Mantenimiento basado en condición, análisis de vibraciones, diagnóstico predictivo, gestión del riesgo.

## **Introducción**

La continuidad operativa de los equipos rotativos es esencial en la industria minera, ya que las fallas imprevistas generan pérdidas económicas significativas y riesgos para la seguridad. En este contexto, el Mantenimiento Basado en Condición (CBM), enmarcado en la gestión de activos según la norma ISO 55000, permite monitorear en tiempo real componentes críticos, anticipar fallas y tomar decisiones fundamentadas en datos.

Este trabajo presenta un caso aplicado en la planta de beneficio de Aris Mining, Segovia, donde la integración de técnicas predictivas avanzadas permitió detectar de forma temprana una falla incipiente en el rodamiento del reductor principal del molino de bolas Kennedy. El análisis evidencia que los sistemas SCADA convencionales, basados en valores globales de vibración, presentan limitaciones para la detección temprana de defectos, lo que incrementa el riesgo de fallas

catastróficas y paradas no programadas. La aplicación de un enfoque CBM multivariable se consolida como una alternativa técnica efectiva para mejorar la confiabilidad y la gestión del riesgo en activos rotativos de alta criticidad.

## **Objetivo General**

Demostrar la efectividad del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) como herramienta de gestión de activos para la detección temprana, el modelado y el control de fallas incipientes en equipos rotativos críticos de la industria minera, mediante la aplicación integrada de técnicas predictivas, y comparar la respuesta y eficacia de diferentes técnicas predictivas en la detección de fallas en rodamientos y su aporte al seguimiento de la evolución de la falla, con el fin de optimizar el control del riesgo.

**Metodología**

La metodología aplicada se basó en la integración de técnicas predictivas para evaluar la condición del sistema motriz del molino de bolas principal. El enfoque combinó la adquisición de datos en campo, el análisis de variables de condición y la validación cruzada de resultados, con el objetivo de identificar de forma temprana una falla incipiente y definir el momento óptimo de intervención.

**Detección inicial y monitoreo continuo**

El monitoreo rutinario de las variables de condición en los equipos críticos permitió generar un historial de datos que facilitó el establecimiento de rangos operativos y la identificación de tendencias anómalas. En este caso, el 13 de febrero de 2025, el análisis de aceleración envolvente (gE) reveló la presencia de una falla incipiente en el rodamiento de entrada del reductor NGC del sistema motriz del molino Kennedy. Los datos indicaron la aparición de frecuencias características de falla en la pista interna (Ball Pass Frequency Inner Ring - BPFI), evidenciando el inicio de un proceso de deterioro en el componente [6].

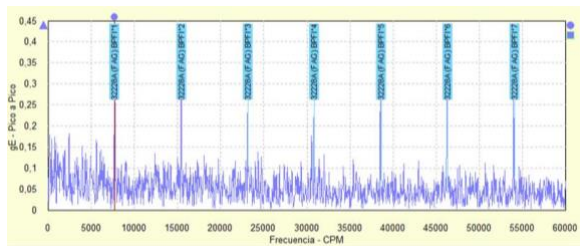


Fig. 1. Espectro de frecuencia con bandas BPFI, rodamiento eje entrada reductor NGC.

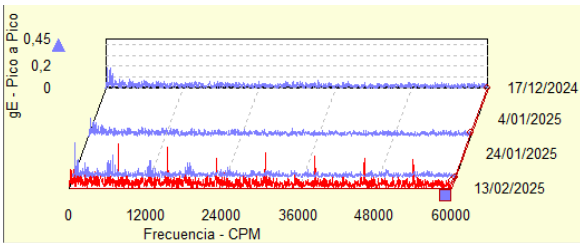


Fig. 2. Espectro tipo cascada histórico del rodamiento eje entrada reductor NGC.

Las figuras 1 y 2 ilustran cómo, a través del monitoreo de vibraciones y el análisis

espectral de la aceleración envolvente (gE), se detectaron por primera vez picos anómalos en una rutina de mantenimiento basado en condición (CBM). Estos picos, registrados en el reductor NGC de la transmisión del molino, correspondieron a la frecuencia de falla BPFI, confirmando la presencia de una anomalía en el rodamiento de entrada y destacando la efectividad del monitoreo predictivo en la identificación temprana de fallas.

El monitoreo integral de variables de condición, conforme a la norma ISO 17359, se inició inmediatamente tras la detección de la frecuencia BPFI, con mediciones diarias orientadas a generar información suficiente para la toma de decisiones. Este protocolo permitió determinar la velocidad de degradación del rodamiento y realizar el seguimiento de su evolución, facilitando la planificación de la intervención correctiva sin comprometer la producción, la seguridad ni la integridad del equipo.

**Instrumentos y técnicas de monitoreo**

Para el monitoreo integral del reductor NGC, se emplearon diversas técnicas predictivas y equipos especializados, como se resume en la siguiente tabla.

Tabla 1. Técnicas usadas para el monitoreo integral de la transmisión del molino Kennedy.

| Técnica            | Equipo                     | Parámetros                                       | Normativa                            |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Vibraciones        | Colector DBX               | gE, BPFI (2-10 kHz)                              | ISO 18436-2                          |
| Termografía        | Cámara FLIR E96            | ΔT superficial (°C)                              | ASTM E1934-99                        |
| Firma eléctrica    | Analizador ATPOL II        | FFT, THD (< 3%)<br>Modulación de corriente       | IEEE 1415<br>IEC 60034-1             |
| Nivel Acústico     | Fluke ii910                | dB (20-30 kHz)                                   | ISO 29821<br>ISO 13373-2             |
| Análisis de aceite | Laboratorio de lubricantes | Fe >20<br>Si >15<br>H2O >0.1<br>Visc. > 10% 40°C | ASTM D6595<br>ISO 4406<br>ASTM D6304 |

El análisis de vibraciones se realizó mediante el colector DBX, empleando aceleración envolvente (gE) para la detección de frecuencias características de falla en rodamientos. La presencia de picos en BPFI evidenció daño progresivo en la pista interna del rodamiento del reductor, confirmando un proceso de deterioro en evolución.

La termografía infrarroja con cámara FLIR E96 permitió identificar un incremento sostenido de la temperatura superficial en el rodamiento de entrada del reductor NGC, superando los límites operativos y confirmando condiciones de fricción anormal.

El análisis acústico se efectuó con la cámara FLUKE ii910, registrando niveles anómalos de ruido ultrasónico en el rango de 20–30 kHz, asociados a defectos en rodamientos y engranajes, en concordancia con los hallazgos del análisis vibracional [8].

La firma eléctrica del motor se evaluó mediante el analizador ATPOL II, utilizando FFT para identificar modulaciones de corriente y superposición de armónicos. Los resultados mostraron picos coincidentes con las frecuencias de falla detectadas por vibraciones y acústica, confirmando la presencia de una anomalía mecánica en el sistema (Fig. 3) [7].



Fig. 3. Firma eléctrica del motor del molino.

Finalmente, el análisis de aceite lubricante se realizó mediante espectrometría atómica, evaluando metales de desgaste, viscosidad y contenido de agua. Los resultados evidenciaron niveles estables de hierro (7 ppm) y silicio (9 ppm), sin presencia de contaminantes críticos durante el período de monitoreo.

#### Análisis de datos y modelado de falla

Para evaluar la evolución de la falla y determinar el momento óptimo de intervención, los datos recopilados fueron sometidos a un análisis detallado. Se verificó los comportamientos de cada variable (vibración, temperatura y ruido) y su

correlación con la degradación progresiva del rodamiento.

Se tomó como referencia el modelo de las seis fases de evolución de falla en rodamientos descrito por SKF (Figura 4) para el monitoreo mediante la variable de aceleración envolvente (gE), identificada como la más representativa y sensible para esta tarea.

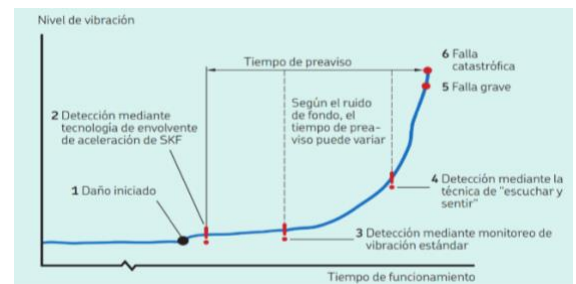


Fig. 4. Fases de evolución de falla en rodamientos [6].

Esta metodología permitió disponer de información precisa para respaldar la toma de decisiones del equipo de mantenimiento y programar de manera óptima la intervención del equipo, minimizando impactos operativos.

#### Validación y control de calidad

Para asegurar la precisión y confiabilidad de los resultados, se aplicaron controles cruzados mediante la integración de múltiples técnicas predictivas. La correlación entre las tendencias de vibraciones, temperatura, análisis acústico y firma eléctrica permitió validar el diagnóstico de la falla incipiente y su progresión, fortaleciendo la toma de decisiones para la intervención.

Todos los equipos de medición contaban con certificados de calibración vigentes y el personal estaba debidamente calificado en técnicas de monitoreo predictivo, en cumplimiento de estándares internacionales para la inspección y el diagnóstico de maquinaria industrial.

La metodología aplicada en este caso es plenamente replicable en otros equipos rotativos de alta criticidad, siempre que se disponga de una adecuada selección de variables, personal certificado y protocolos estandarizados de adquisición y análisis de

datos. El enfoque multitécnica permite reducir la incertidumbre diagnóstica y fortalecer la toma de decisiones basada en condición, alineándose con las buenas prácticas de gestión de activos establecidas en la norma ISO 55000.

Resultados

Monitoreo multivariable

El programa de monitoreo abarcó cuatro variables clave (Figura 5), destacando que los parámetros acústicos (dB) y de aceleración envolvente (gE) mostraron la mayor sensibilidad para detectar el deterioro incipiente. En contraste, la velocidad vibratoria (mm/s) y la temperatura sólo exhibieron variaciones significativas durante la fase final de falla del rodamiento, cuando el daño ya estaba avanzado.

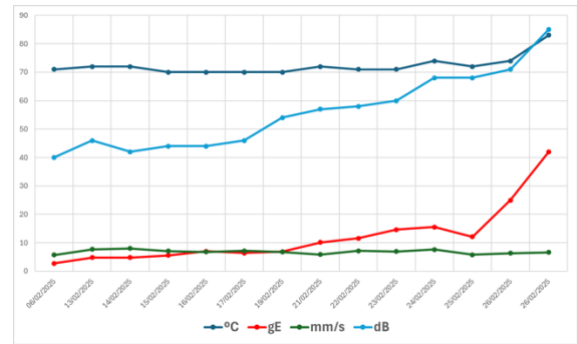


Fig. 5. Comportamientos variables en monitoreo.

Se determinó que la temperatura, en combinación con la aceleración envolvente (gE), debía ser el criterio definitivo para la detención del equipo y la intervención de este. Esta conclusión se fundamentó en la teoría de la curva P-F [2], que describe el incremento de temperatura como una de las últimas etapas antes de la falla funcional.

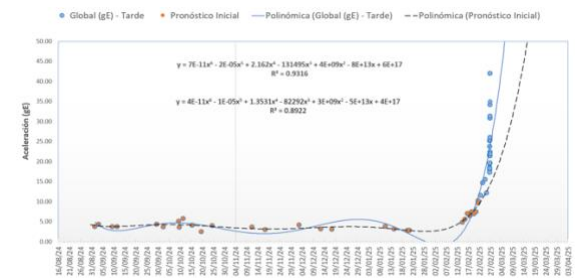


Fig. 6. Modelado del comportamiento de gE en el rodamiento eje entrada reductor NGC.

Asimismo, se desarrolló un modelo matemático f(t) para cuantificar la evolución temporal de la aceleración envolvente (gE), representado en la Figura 6. Este modelo predictivo permitió: (1) Caracterizar con precisión la tendencia de degradación del rodamiento. (2) Estimar el tiempo remanente hasta falla funcional mediante extrapolación de curvas. (3) Identificar el punto óptimo de intervención antes de alcanzar umbrales críticos.

El monitoreo multivariable permitió extender la operación del reductor dentro de márgenes seguros, optimizando la vida útil del componente y facilitando la preparación de la intervención. Como resultado, se programó el reemplazo para el 27 de febrero de 2025, evitando así una falla catastrófica y garantizando: (1) la continuidad operativa, (2) la protección del equipo principal, y (3) el aprovechamiento máximo del componente hasta sus límites seguros.

Con el fin de evidenciar de manera cuantitativa el impacto del Mantenimiento Basado en Condición en la gestión del activo, se compararon indicadores clave de desempeño (KPIs) entre un escenario de falla no programada y el escenario real de intervención planificada basada en CBM.

Tabla 2. Comparación de indicadores clave antes y después de la implementación del CBM

| Indicador                    | Escenario sin CBM        | Escenario con CBM |
|------------------------------|--------------------------|-------------------|
| Tipo de intervención         | Correctiva de emergencia | Planificada       |
| Tiempo de parada             | > 72 h                   | 18.5 h            |
| Riesgo de falla catastrófica | Alto                     | Eliminado         |
| Impacto en producción        | Pérdida significativa    | Nulo              |
| Costo estimado               | > USD 4.2 MM             | Evitado           |

Intervención del equipo

La intervención del equipo se ejecutó bajo un Plan Detallado de Trabajo (PDT) preestablecido que incluía diagramas de Gantt y protocolos estandarizados, permitiendo la sustitución del reductor principal en solo 18.5 horas mediante una coordinación precisa entre equipos. Esta planificación anticipada

minimizó el impacto operativo al garantizar la continuidad productiva sin paradas no programadas, evitando así una falla catastrófica del rodamiento.

Como resultado tangible, la intervención planificada generó un ahorro estimado de *USD \$4.2 millones* comparado con los costos típicos de una reparación de emergencia, demostrando la efectividad de integrar el monitoreo predictivo (CBM) con protocolos de acción estructurados para la gestión de activos críticos.

#### Análisis de causa raíz

El análisis post-falla del reductor NGC, realizado en un taller especializado, identificó un deterioro severo del rodamiento del eje de entrada, evidenciado por grietas, entalladuras profundas y socavaciones en pistas y rodillos, típicas de fatiga avanzada del material (Fig. 7). Adicionalmente, se observó acumulación de limalla metálica y una deformación plástica del alojamiento, con incremento del diámetro de Ø250 mm a 251.3 mm, lo que generó pérdida de concentricidad y afectó el correcto asentamiento del rodamiento.



Fig. 7. Daño encontrado en rodamiento eje entrada reductor NGC.

La investigación determinó que la falla prematura se debió a la convergencia de los siguientes factores:

*Incompatibilidad de diseño:* El rodamiento cónico 32228, con tolerancia angular inferior a  $0.05^\circ$ , resultó inadecuado frente a los desplazamientos dinámicos del acople ( $1.5^\circ$ – $3^\circ$ ), provocando una distribución asimétrica de cargas y acelerando la fatiga del material.

*Sobrecarga operacional:* El aumento de potencia del sistema motriz de 1500 hp a 2300 hp redujo el factor de seguridad del reductor de 2.0 a 1.5. Los frecuentes ciclos de arranque generaron picos de torque, lubricación transitoria deficiente y cargas variables, promoviendo desgaste acelerado y microfisuración en los elementos rodantes.

*Deficiencias de manufactura:* La deformación del alojamiento se asoció a esfuerzos residuales derivados de procesos de fabricación inadecuados, reduciendo su capacidad estructural y comprometiendo la geometría requerida para el correcto montaje del rodamiento.

Como acción correctiva, se reemplazó el rodamiento por uno de mayor capacidad y se reconstruyó el alojamiento para restablecer la geometría y resistencia del conjunto, mejorando la confiabilidad operativa del reductor.

#### Conclusiones

La implementación del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) en la planta de beneficio de Aris Mining demostró la efectividad de las técnicas predictivas para la gestión de activos rotativos críticos. La integración de análisis de vibraciones, termografía, monitoreo acústico y firma eléctrica permitió identificar de forma temprana el deterioro incipiente del rodamiento del reductor del molino, cuantificar su condición y programar una intervención controlada. Esta estrategia evitó una falla catastrófica y redujo de manera significativa el impacto operacional y económico asociado a paradas no planificadas.

El resultado se sustentó en la aplicación de un enfoque multitécnica, la ejecución de un plan de contingencia estructurado y la coordinación interdisciplinaria durante la intervención. El análisis de causa raíz evidenció deficiencias en el diseño del reductor NGC, cuyas acciones correctivas

incrementaron la robustez del sistema y mejoraron los indicadores de confiabilidad.

Este caso establece un referente metodológico para la gestión predictiva de equipos rotativos, validando que el CBM trasciende el diagnóstico y se consolida como una herramienta estratégica para el control del riesgo y la optimización del valor de los activos. El enfoque presentado es replicable en otros entornos industriales y aporta sustento técnico para la toma de decisiones de inversión en tecnologías predictivas.

### **Referencias**

- [1] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for fault detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, Oct. 2000, doi: 10.1109/41.873206.
- [2] F. S. Nowlan and H. F. Heap, *Reliability-Centered Maintenance*, Rep. AD-A066579, U.S. Department of Defense, Washington, DC, USA, Dec. 1978. [Online]. Available: <https://www.dau.edu/cop/log/documents/reliability-centered-maintenance-fs-nowlan-and-howard-f-heap-dtd-dec-1978>
- [3] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [4] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, 2nd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [5] C. Moya and J. Ulloa, "Técnicas avanzadas para la detección temprana de fallas en equipos rotativos," *Revista de Ingeniería y Mantenimiento Predictivo*, vol. 15, no. 3, pp. 45–58, 2021.
- [6] SKF Group, *Rodamientos: Guía técnica de mantenimiento*, SKF Media Hub, Gothenburg, Sweden, 2019. [Online]. Available: <https://cdn.skfmediahub.skf.com>
- [7] Pro Corporation, *ALL-TEST PRO On-Line II™: Electrical Signature Analysis Specifications*, Pro Corporation, Salt Lake City, UT, USA, 2019. [Online]. Available: <https://alltestpro.com/wp-content/uploads/2019/08/ATPOL-II-1000vSpec-Sheet-Spanish.pdf>
- [8] Fluke Corporation, *Fluke ii910 Precision Acoustic Imager*, Fluke Corporation, Everett, WA, USA, 2022. [Online]. Available: <https://www.fluke.com>
- [9] Sicma21, "Mantenimiento predictivo: técnicas de monitoreo del estado," Sicma21 Blog, 2023. [Online]. Available: <https://www.sicma21.com/tecnicas-de-monitoreo-del-estado/>

César Alfonso Moreno Ayala, es Ingeniero Electromecánico, con Maestría en Administración de Empresas (MBA) y certificación internacional CMRP. Cuenta con más de 16 años de experiencia en mantenimiento y confiabilidad operacional en los sectores de minería, energía, petróleo y cemento. Actualmente se desempeña como Superintendente de Mantenimiento en Aris Mining, donde lidera los equipos de Confiabilidad e Ingeniería de Mantenimiento y la gestión de activos críticos. Ha implementado programas de mantenimiento basado en condición y optimizado procesos de planeación, control de costos y gestión de repuestos. Su experiencia se enfoca en gestión de activos, análisis de fallas y mejora de la confiabilidad, con énfasis en la toma de decisiones basada en datos y el control del riesgo.

Nombre del autor: César Alfonso Moreno Ayala  
Celular personal: 3204994422  
Celular corporativo: 3235639755  
Dirección del autor: Calle 192 # 11A-51  
Email: cesarmoray@gmail.com  
Ciudad: Bogotá  
País: Colombia