

Predictive Maintenance and Fault Detection in Open-Pit Mining Shovels: A Systematic Literature Review

Luis D. Santuyo¹; Grace C. Ramos²; Arturo G. Velasquez, Mg³; Maria E. Alca, Mg⁴
^{1,2,3,4} Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, ¹U23309407@utp.edu.pe, ²U23304484@utp.edu.pe,
³C25661@utp.edu.pe, ⁴C26207@utp.edu.pe

Abstract—Predictive maintenance has become a key strategy for improving reliability and availability in large-scale open-pit mining operations, where mining shovels play a critical role in the loading process. This paper presents a Systematic Literature Review focused on predictive maintenance, condition monitoring, and fault detection applied to mining shovels. Following the PRISMA guidelines and the PICOC framework, 48 studies indexed in Scopus were analyzed. The results show a growing adoption of data-driven approaches, particularly machine learning and signal processing, mainly based on vibration data and focused on structural subsystems. However, challenges related to industrial validation, data quality, generalization, and interpretability remain.

Keywords—Predictive maintenance; condition monitoring; fault detection; mining shovels; open-pit mining.

Mantenimiento Predictivo y Detección de Fallas en Palas Mineras: Una Revisión Sistemática de la Literatura

Luis D. Santuyo¹; Grace C. Ramos²; Arturo G. Velasquez, Mg³; Maria E. Alca, Mg⁴
^{1,2,3,4} Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, ¹U23309407@utp.edu.pe, ²U23304484@utp.edu.pe, ³C25661@utp.edu.pe, ⁴C26207@utp.edu.pe

Resumen—El mantenimiento predictivo se ha convertido en una estrategia clave para mejorar la fiabilidad y la disponibilidad en operaciones mineras a cielo abierto a gran escala, donde las palas mineras desempeñan un papel fundamental en el proceso de carga. Este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura centrada en el mantenimiento predictivo, el monitoreo de condición y la detección de fallas aplicados a las palas mineras. Siguiendo las directrices PRISMA y el marco PICOC, se analizaron 48 estudios indexados en Scopus. Los resultados muestran una creciente adopción de enfoques basados en datos, en particular el aprendizaje automático y el procesamiento de señales, principalmente basados en datos de vibración y centrados en subsistemas estructurales. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la validación industrial, la calidad de los datos, la generalización y la interpretabilidad.

Palabras clave—Mantenimiento predictivo; monitoreo de condición; detección de fallas; palas mineras; minería a cielo abierto.

I. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento predictivo ha surgido a partir de las estrategias industriales tradicionales de mantenimiento desde el final del siglo XX, gracias a la evolución del monitoreo de condiciones y los progresos en instrumentación y análisis de datos[1]. La utilización de este recurso ha cobrado relevancia en la minería a gran escala, debido a que los equipos de gran tonelaje poseen un alto grado de complejidad, costos significativos y un nivel crítico elevado [2].

En las explotaciones mineras a cielo abierto, las palas desempeñan un papel fundamental en el proceso de carga. Para lograr una operación eficiente, resulta clave la fiabilidad y disponibilidad de los equipos empleados. Las fallas inesperadas en estos sistemas pueden generar considerables pérdidas de producción, incremento de los costos asociados al mantenimiento y riesgos operativos.

Este artículo está estructurado del modo siguiente: la sección 2 describe el marco metodológico de la revisión sistemática que contiene la estrategia de búsqueda, los criterios para la definición de los estudios que son admisibles y el método para la selección de estos según las directrices de PRISMA. La sección 3 expone y resume los hallazgos de la revisión e incluye las técnicas y metodologías empleadas, los tipos y fuentes de datos utilizados, los subsistemas estudiados, las conclusiones más relevantes descritas en la bibliografía y las limitaciones encontradas en la bibliografía. La sección 4 concibe un análisis crítico de los hallazgos conseguidos, centrando este análisis en las tendencias, los retos y las

lagunas de investigación vinculadas al mantenimiento predictivo de palas mineras. Finalmente, la sección 5 expone las conclusiones obtenidas en el estudio.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo de estudio

En esta investigación se aborda la revisión sistemática de la literatura (RSL) en el ámbito de la ingeniería. Su objetivo principal ha sido el de analizar de forma crítica y ordenada aquellas los métodos de detección de fallas y mantenimiento predictivo utilizados en las palas de minería a cielo abierto, cuya revisión pretendía ser la de ubicar, seleccionar y compendiar las evidencias científicas. La revisión sistemática se entregó bajo un proceso que fue metódico, claro y replicable.

B. Protocolo de revisión y directrices PRISMA

El proceso de revisión se realizó siguiendo las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), las cuales proporcionan una metodología estandarizada que garantiza la calidad, la uniformidad y la trazabilidad en la selección de los estudios incluidos. A lo largo de todas las etapas del proceso de revisión, desde la identificación inicial de los artículos hasta la selección final de los estudios incluidos, se aplicaron sistemáticamente estas directrices.

C. Preguntas de investigación y enfoque PICOC

Las preguntas de investigación que informan esta revisión fueron elaboradas a partir del método PICOC (Población, Intervención, Comparación, Resultados y Contexto). Esto hizo posible que el análisis pudiera realizarse sistemáticamente y mantener la coherencia entre los objetivos, la estrategia de búsqueda y el análisis de los resultados.

TABLA I
MATRIZ PICOC

Elemento	Descripción aplicada a la RSL
P (Población)	Palas mineras utilizadas en operaciones de minería a cielo abierto, incluyendo <i>electric shovels</i> , <i>hydraulic shovels</i> , <i>rope shovels</i> y equipos de carguío minero funcionalmente equivalentes.

I (Intervention)	Técnicas de mantenimiento predictivo, monitoreo de condición, diagnóstico y pronóstico de fallas, incluyendo enfoques basados en datos, <i>Prognostics and Health Management</i> (PHM), aprendizaje automático y métodos analíticos avanzados aplicados a palas mineras.
C (Comparison)	No se establece una comparación obligatoria. Algunos estudios incluyen comparaciones entre métodos tradicionales y predictivos, o entre diferentes técnicas de diagnóstico y pronóstico, las cuales son consideradas cuando están disponibles.
O (Outcomes)	Detección temprana de fallas, mejora de la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, reducción del tiempo de inactividad no planificado, optimización de estrategias de mantenimiento y soporte a la toma de decisiones en operaciones mineras.
C (Context)	Operaciones de minería a cielo abierto (<i>open-pit mining</i> , <i>surface mining</i>), en condiciones reales de operación industrial.

Las preguntas de investigación que orientan la revisión sistemática de la literatura se definieron a partir del alcance establecido por medio de la matriz PICOC:

- Pregunta de investigación principal

¿Qué métodos de mantenimiento predictivo, monitoreo de condición y diagnóstico de fallas han sido aplicadas a palas mineras utilizadas en operaciones de minería a cielo abierto?

- Preguntas de investigación secundarias

¿Qué tipos de datos y enfoques analíticos se emplean en los estudios para el diagnóstico y pronóstico de fallas en palas mineras en minería a cielo abierto?

¿Qué componentes o subsistemas de las palas mineras son abordados con mayor frecuencia por las técnicas de mantenimiento predictivo reportadas en la literatura?

¿Cuáles son los principales resultados reportados en términos de detección temprana de fallas, confiabilidad del equipo y reducción del tiempo de inactividad?

¿Cuáles son las principales limitaciones, desafíos y vacíos de investigación identificados en los estudios existentes sobre mantenimiento predictivo aplicado a palas mineras?

D. Ecuación de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó exclusivamente en la base de datos Scopus, debido a su amplia cobertura de literatura científica en el ámbito de la ingeniería. La ecuación de búsqueda se estructuró en tres bloques conceptuales principales —equipos de carguío minero, mantenimiento predictivo y diagnóstico de fallas, y minería a cielo abierto— y se formuló mediante operadores booleanos de la siguiente manera: ((ALL("mining shovel" OR "electric shovel" OR "hydraulic shovel" OR "rope shovel" OR "mining loading equipment")) AND ALL("predictive maintenance" OR "condition monitoring" OR "fault diagnosis" OR "fault detection" OR "prognostics" OR "PHM" OR "machine learning" OR "data-driven")) AND ALL("open-pit mining"

OR "open cast mining" OR "surface mining")). Posteriormente, se aplicaron filtros adicionales relacionados con el año de publicación, el acceso abierto y el tipo de documento como parte del proceso de selección de estudios.

E. Criterios de elegibilidad

Para asegurar la relevancia de los estudios que se seleccionaron, se definieron criterios de inclusión y exclusión. Los artículos que traten de manera explícita la detección de fallas en las palas mineras o el mantenimiento predictivo dentro del ámbito de la minería a cielo abierto fueron tomados en cuenta por los criterios de inclusión. Se descartaron los estudios que no se ajustaban al alcance establecido, que investigaban otros tipos de equipos o que no ofrecían evidencia importante después de realizar la evaluación a texto completo.

F. Proceso de selección de estudios

La selección de los estudios se realizó en múltiples fases: detección preliminar de artículos, supresión de duplicados, cribado por título y resumen, y análisis del texto completo. Como consecuencia de este procedimiento, al final se eligieron 48 artículos para un análisis minucioso.

TABLA II
PROCESO DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN DE ESTUDIOS

Etapas del proceso	Criterio aplicado	Nº de registros	Registros excluidos
Identificación inicial	Ecuación de búsqueda en Scopus	4669	—
Filtro por año	Publicaciones desde 2016 en adelante	3323	1346
Filtro de acceso	Artículos de acceso abierto (Open Access)	1303	2020
Cribado por título y resumen	Relevancia temática según PICOC	163	1140
Evaluación a texto completo	Cumplimiento de criterios de inclusión	48	115

A partir de la aplicación de la ecuación de búsqueda en Scopus, se identificaron inicialmente 4669 registros. Posteriormente, se aplicó un filtro temporal considerando únicamente estudios publicados a partir del año 2016, lo que redujo el conjunto a 3323 artículos. A continuación, se seleccionaron únicamente trabajos de acceso abierto, obteniéndose 1303 registros. Estos artículos fueron sometidos a un cribado por título y resumen, evaluando su pertinencia con base en el enfoque PICOC y las preguntas de investigación, lo que permitió seleccionar 163 estudios. Finalmente, se realizó una evaluación exhaustiva del texto completo de estos artículos, resultando en la inclusión de 48 estudios para el análisis final.

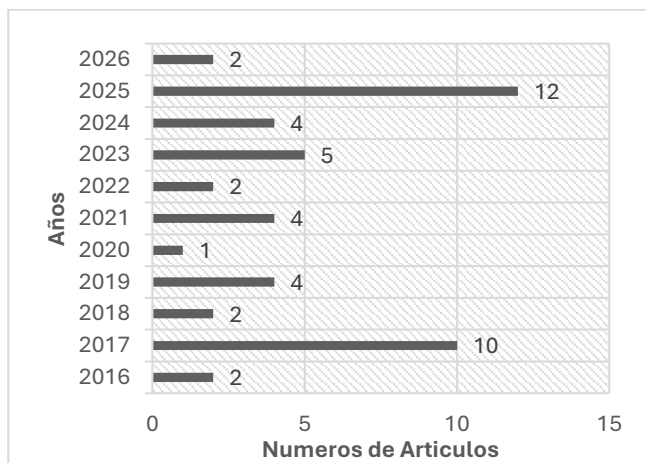


Fig. 1 Distribution of years of the 48 articles

G. Evaluación de calidad de los estudios

Con el fin de asegurar la validez de los resultados sintetizados, se realizó una evaluación cualitativa de la calidad de los estudios incluidos. Se consideraron criterios como: (i) claridad metodológica, (ii) disponibilidad de datos reales o industriales, (iii) validación experimental o en campo, y (iv) coherencia entre objetivos y resultados.

Cada estudio fue evaluado de manera descriptiva, identificando posibles riesgos de sesgo relacionados con el uso de datos simulados, validaciones limitadas o ausencia de comparación entre métodos.

H. Extracción y síntesis de datos

Se utilizó una matriz estructurada para obtener los datos significativos de los estudios escogidos, la cual contenía, entre otros elementos, los objetivos, métodos, clases de datos, subsistemas analizados y las limitaciones informadas. Posteriormente, los datos se sintetizaron a través de una perspectiva cualitativa. Se organizaron los hallazgos en categorías temáticas que correspondían con las preguntas de investigación, sin llevar a cabo un meta-análisis cuantitativo.

III. RESULTADOS

A. Caracterización general de los estudios incluidos

Tras la selección de las 48 investigaciones, se procedió al análisis sobre la supervisión de condiciones, el mantenimiento predictivo y la identificación de averías en palas mineras utilizadas para trabajos de minería a cielo abierto. En términos generales, la literatura revisada muestra un interés en aumento por el uso de métodos avanzados de análisis para optimizar la confiabilidad, la disponibilidad y el rendimiento operativo de estos equipos cruciales. Los estudios llevados a cabo, que no sólo se centran en la detección temprana de fallos, así como en la evaluación del estado de salud de las máquinas, también contemplan tanto los entornos reales en los que opera la mina como los entornos experimentales o simulados.

La literatura revisada constata, una gran heterogeneidad entre los métodos analíticos considerados, que incluyen técnicas de aprendizaje automático, modelos de aprendizaje profundo, procesamiento de señales, análisis estadístico y

métodos de fiabilidad, así como las combinaciones híbridas que pueden derivarse de las perspectivas utilizadas.

B. Métodos aplicados al mantenimiento predictivo y diagnóstico de fallas

Para dar respuesta a la primera pregunta de la investigación, se ha visto conveniente identificar los métodos y técnicas empleadas en las investigaciones revisadas respecto al diagnóstico de fallos, la supervisión del estado y el mantenimiento predictivo de palas de minería a cielo abierto. Es así que en La Tabla III, se detallan los principales métodos categorizados de acuerdo a la similitud de los resultados presentados en las distintas investigaciones. Esta categorización permite determinar cuál es el sentido de la literatura y definir una variable de comparación para contrastar el grado de madurez y el alcance de los métodos de los que se hace uso.

TABLA III
MÉTODOS APLICADOS EN LOS ESTUDIOS

Métodos	Autores	Beneficios
Deep Learning	[4], [5], [6], [7], [8]	Aplicado a diagnóstico y pronóstico con datos sensoriales
ML clásico	[9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]	Clasificación y detección temprana de fallas
Procesamiento de señales	[17], [18], [19], [20], [21], [22]	Análisis de vibración y señales temporales
Confiabilidad / estadístico	[23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]	Evaluación estructural y de desempeño
Optimización	[23], [31], [32], [33]	Reducción de costos y mejora operativa
Otros / híbridos	[34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51]	Combinaciones metodológicas

Para facilitar la identificación de patrones metodológicos predominantes, la Figura 2 muestra la distribución de estos enfoques.

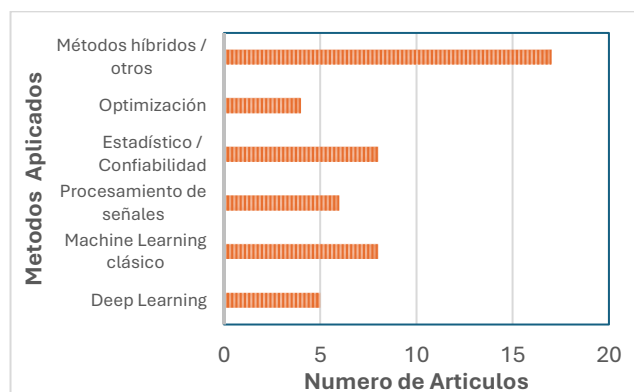


Fig. 2 Distribution of methodological approaches used in predictive maintenance studies of mining shovels.

La presente revisión demuestra que los enfoques relacionados con el aprendizaje automático, tanto en su versión convencional, así como también mediante técnicas de deep learning, constituyen la alternativa más empleada, ya que, cada cierto tiempo, estas se emplean para la realización

de tareas de clasificación, diagnóstico y predicción de fallas haciendo uso de la información sensorial. Poder modelar relaciones no lineales de forma compleja o bien poder trabajar con un gran tamaño de datos procedentes de sistemas que monitorean continuamente por características de estos métodos.

Igualmente, muchas de las investigaciones valen para aplicar técnicas de procesamiento de señales, llevándose a cabo el estudio de vibraciones y señales temporales, éstas como base para detectar antes de ocurrir anomalías en los componentes críticos de las palas mineras. La aplicación de estos métodos se lleva a cabo de forma aislada o complementando técnicas de aprendizaje automático, lo que se considera una tendencia en el uso de estructuras híbridas que apoyan modelos predictivos y gestión de extraer características.

De igual forma investigaciones que utilizan métodos de estadísticas y de confiabilidad que pretenden analizar el rendimiento de los componentes, estudiar la vida útil o bien analizar las fallas a través de la mirada probabilística. La planificación del mantenimiento y el estudio de los elementos estructurales son dos campos en los que estos procedimientos tienen una importancia especial.

En resumen, se evidencia el interés en la combinación de diferentes técnicas para mejorar la eficacia operativa, reducir los costos y aumentar la solidez de los sistemas de mantenimiento predictivo a través del uso de metodologías híbridas y enfoques de optimización. En términos generales, estos resultados muestran un avance desde métodos convencionales hasta soluciones más complejas y combinadas, que son apropiadas para la complejidad de los procesos mineros a cielo abierto.

C. Tipos y fuentes de datos utilizados para el diagnóstico y pronóstico de fallas

Con el fin de responder a la segunda pregunta de investigación, se analizaron los tipos y las fuentes de datos empleados en los estudios revisados para el diagnóstico y pronóstico de fallas en palas mineras utilizadas en minería a cielo abierto. La Tabla IV resume los principales tipos de datos identificados, así como sus fuentes predominantes. En términos generales, los estudios recurren principalmente a datos obtenidos mediante sistemas de monitoreo de condición, los cuales permiten capturar el comportamiento dinámico de componentes críticos durante la operación. Asimismo, se identificó el uso de registros históricos de mantenimiento y operación, empleados para complementar el análisis y contextualizar los eventos de falla. En menor medida, algunos trabajos incorporan datos operacionales provenientes de sistemas de control industrial o datos generados mediante simulación, evidenciando una limitada integración de fuentes heterogéneas en los enfoques actuales.

TABLA IV
TIPOS Y FUENTES DE DATOS UTILIZADOS

Tipo de dato	Artículos (ID)	Fuente predominante
Vibración	[4], [17], [5], [34], [33], [18], [7], [39], [40], [8], [14], [15], [41], [43], [44], [19], [20], [49], [22], [21]	Sensores industriales/laboratorio

Registros de mantenimiento	[23],[5],[32],[25],[26],[27],[28],[29],[30],[46],[51]	Datos históricos operacionales
Datos operacionales (SCADA)	[23]	Sistemas de monitoreo en mina
Simulación / datos sintéticos	[17], [41]	Modelos numéricos
Otros (eléctricos, acústicos)	[4], [6], [38]	Aplicaciones específicas

Para complementar la síntesis presentada en la Tabla IV, la Figura 3 resume de forma visual los principales tipos de datos empleados en los estudios revisados.

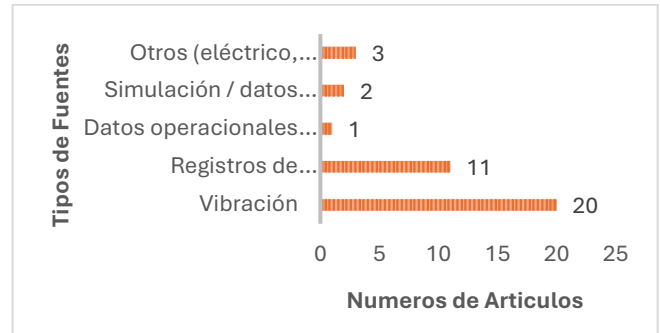


Fig. 3. Data types used for condition monitoring and fault diagnosis in mining shovels.

El análisis de la literatura muestra que los datos de vibración constituyen la principal fuente de información utilizada para el monitoreo de condición y el diagnóstico de fallas en palas mineras. Esta preferencia se relaciona con la sensibilidad de dichas señales frente a cambios en el estado mecánico de componentes críticos y con la madurez de las técnicas de adquisición y procesamiento en entornos industriales. De manera complementaria, varios estudios integran registros históricos de mantenimiento y datos operacionales para apoyar el análisis de confiabilidad y la planificación del mantenimiento.

Esta distribución muestra una dependencia notoria de los datos sensoriales individuales, lo que restringe la representación completa del estado del sistema y prevé algunos de los retos que se discutirán más adelante.

D. Subsistemas analizados en palas mineras mediante técnicas de mantenimiento predictivo

Para abordar la tercera pregunta de investigación, se examinó qué componentes y subsistemas de las palas mineras han sido analizados con mayor frecuencia en la literatura mediante técnicas de mantenimiento predictivo y diagnóstico de fallas. La Tabla V presenta una clasificación de los principales subsistemas estudiados y su correspondiente presencia en los artículos revisados.

TABLA V
SUBSISTEMAS ANALIZADOS EN PALAS MINERAS

Subsistema	Artículos (ID)	Comentario
Estructural (boom, bucket, chasis)	[23],[24],[17],[34],[25],[13],[39],[40],[26],[28],[43],[30],[47],[48],[50],[51]	Alta criticidad operative

Rodamientos	[4], [5], [32], [35], [38], [44], [49]	Frecuente uso de vibración
Engranajes / gearbox	[12], [13], [14], [15], [29], [21]	Transmisión de potencia
Sistema hidráulico	[6], [41], [42], [16], [45]	Menor número de estudios específicos
Sistema completo / multicomponente	[23], [5], [31], [32], [35], [33], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [46], [51]	Análisis global

Esta concentración de estudios en determinados subsistemas refleja una priorización basada en criticidad operativa, aunque también pone de manifiesto una cobertura desigual del sistema completo de la pala minera.

Los resultados indican que los componentes estructurales, tales como el brazo, el cucharón y el chasis, constituyen el foco principal de atención en la literatura revisada, debido a su alta criticidad operativa y a su influencia directa en la seguridad y disponibilidad de las palas mineras.

En contraste, el sistema hidráulico ha sido abordado en un número relativamente menor de estudios específicos, a pesar de su relevancia en el desempeño de las palas hidráulicas. Finalmente, se identifican investigaciones que adoptan un enfoque a nivel de sistema completo o multicomponente, integrando el análisis de múltiples subsistemas con el objetivo de evaluar el comportamiento global del equipo y apoyar la toma de decisiones de mantenimiento.

E. Resultados reportados de la aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo

Con el objetivo de responder a la cuarta pregunta de investigación, se analizaron los principales resultados reportados en los estudios revisados en relación con la aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo y diagnóstico de fallas en palas mineras de minería a cielo abierto. La Tabla VI sintetiza los outcomes más frecuentemente abordados en la literatura y su impacto predominante.

TABLA VI
RESULTADOS REPORTADOS

Outcome principal	Artículos (ID)	Tipo de impacto
Estimación de RUL	[17], [34], [7], [39], [40], [8], [14], [15], [41], [43], [29], [44], [47], [30], [45], [47], [19], [48], [20], [49], [50], [22], [21]	Planificación de mantenimiento
Confiabilidad	[23], [31], [32], [35], [25], [26], [27], [28], [44], [30], [46], [51]	Mejora del desempeño
Downtime	[4], [5], [6], [35], [25], [38], [51]	Reducción de paradas no planificadas
Costo	[23], [31], [32], [33], [46]	Optimización económica
Detección de fallas	[4], [5], [6], [13], [19], [20], [22], [21]	Diagnóstico temprano

Los resultados reportados en la literatura se concentran principalmente en la estimación de la vida útil remanente, la mejora de la confiabilidad del equipo y la reducción del tiempo de inactividad no planificado. Estos outcomes reflejan el potencial del mantenimiento predictivo para apoyar la planificación del mantenimiento, optimizar la toma de decisiones y mejorar la continuidad operativa de las palas mineras.

La diversidad de outcomes reportados sugiere que la literatura no se limita a un único objetivo, sino que aborda el mantenimiento predictivo desde perspectivas complementarias, que van desde el diagnóstico temprano hasta la optimización económica de las operaciones

F. Principales limitaciones y vacíos de investigación identificados

Para contestar la quinta pregunta de investigación, se examinaron los obstáculos, las limitaciones y las deficiencias en la investigación que los estudios incluidos reportaron. La Tabla VII resume estos aspectos, así como sus implicaciones generales.

TABLA VII
PRINCIPALES LIMITACIONES Y VACÍOS IDENTIFICADOS

Limitación / vacío	Artículos (ID)	Implicancia
Validación industrial limitada	[17], [6], [38], [7], [8], [41], [44], [19]	Dificulta adopción práctica
Calidad y disponibilidad de datos	[4], [17], [5], [6], [13], [7], [8], [14], [15], [41], [20], [21]	Impacta robustez de modelos
Generalización entre equipos	[4], [5], [6], [7], [8], [41], [19], [20]	Resultados poco transferibles
Interpretabilidad	[4], [5], [6], [7], [8]	Barreras para toma de decisiones
Complejidad computacional	[23], [4], [17], [5], [6], [31], [32], [33], [25], [7], [8], [41], [19]	Restricciones para implementación

El análisis de los estudios incluidos permite identificar un conjunto de limitaciones y vacíos de investigación recurrentes, los cuales se sintetizan en la Tabla VII. Estos aspectos corresponden principalmente a restricciones en la validación industrial de los modelos, a la calidad y disponibilidad de los datos, a dificultades de generalización entre equipos y a desafíos relacionados con la interpretabilidad y complejidad computacional de las soluciones propuestas.

IV. DISCUSIÓN

Esta revisión sistemática permite una crítica de la situación actual de la investigación sobre el mantenimiento predictivo y la detección de fallos en las palas mineras a cielo abierto, por medio de la síntesis de 48 estudios seleccionados según las directrices PRISMA. En esta sección se tratan los patrones, tendencias, retos y vacíos más significativos que se han encontrado en la literatura; además, se incluyen los resultados obtenidos con respecto a las preguntas planteadas para la investigación.

A. Tendencias metodológicas en el mantenimiento predictivo de palas mineras

La adopción en aumento de métodos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para la predicción y el diagnóstico de fallas en palas mineras es uno de los descubrimientos más significativos de esta revisión. Estos métodos han sido usados extensamente, tal como se demostró en los resultados de la Tabla 3, por su habilidad de modelar relaciones complejas y no lineales usando volúmenes grandes de datos sensoriales. Esta tendencia se alinea con el desarrollo general que se ha visto en otros campos de la ingeniería, en los que las perspectivas basadas en datos han cobrado más importancia que los métodos estrictamente fundamentados en modelos físicos.

Sin embargo, la literatura también demuestra que los métodos tradicionales, como el procesamiento de señales y las perspectivas estadísticas y de confiabilidad, siguen teniendo un rol esencial, particularmente en aplicaciones en las que comprender físicamente el fenómeno y su interpretabilidad son cruciales. En este contexto, se percibe un cambio gradual hacia métodos híbridos que fusionan modelos sofisticados de aprendizaje automático con técnicas de extracción de características fundamentadas en señales, con el objetivo de equilibrar la precisión predictiva y la robustez.

Aunque la mayor presencia de estas técnicas de aprendizaje automático y profundo en los estudios de evaluación de la calidad de las maderas es una evolución hacia técnicas más complejas y sofisticadas, la revisión muestra que la transición a estas técnicas más complejas no ha sido lineal ni homogénea. En muchos de los casos la selección de los modelos ha estado muy influenciada por la disponibilidad de datos y cuestiones experimentales más que por un análisis comparativo riguroso de los diferentes enfoques. Igualmente, si bien es cierto que la utilización de modelos de mayor complejidad no ha implicado mejoras significativas en la interpretabilidad ni en la aplicabilidad industrial, lo que parece difundir una falta de relación entre el avance de la metodología y las prácticas industriales del mantenimiento minero.

B. Uso y desafíos asociados a los datos en entornos mineros reales

El estudio de las clases y fuentes de datos de la Tabla III revela que los datos de vibración son el fundamento principal para vigilar el estado y diagnosticar fallas en palas mineras. La sensibilidad de estas señales a las fallas mecánicas incipientes y el desarrollo relativamente avanzado de las tecnologías para adquirir vibraciones en escenarios industriales son los factores que explican esta preferencia. No obstante, la gran dependencia de un solo tipo de dato puede restringir el potencial de los modelos para registrar el comportamiento global del sistema.

Integrar datos operacionales con registros históricos de mantenimiento es un progreso hacia perspectivas más integrales, pero su aplicación todavía es restringida y enfrenta problemas en cuanto a la disponibilidad, calidad y consistencia de la información. Estos problemas son un

reflejo de una situación que se repite en aplicaciones industriales reales, donde los datos a menudo son incompletos, tienen ruido o no están estandarizados. Esto afecta directamente la robustez y la generalización de los modelos predictivos.

C. Enfoque en subsistemas críticos y limitaciones en la cobertura del sistema completo

La bibliografía revisada muestra un enfoque claro en los componentes estructurales, los sistemas de transmisión y los rodamientos en relación con los subsistemas analizados en la Tabla IV. Estos son considerados elementos clave tanto desde el punto de vista operativo como de la seguridad. Esta perspectiva es consistente con el impacto importante que puede tener la avería de estos componentes en la disponibilidad del equipo.

No obstante, aunque es importante para el rendimiento de las palas hidráulicas, se observa que los sistemas hidráulicos reciben menos atención en comparación con otros. Además, aunque hay investigaciones que tienen una perspectiva a nivel de sistema completo, estas todavía son escasas. Esto demuestra la necesidad de crear métodos integrados que tomen en cuenta la interacción entre varios subsistemas y posibiliten un análisis más realista del estado de salud del equipo.

D. Impacto de los resultados reportados y madurez de las aplicaciones

Los resultados observados en la literatura de la Tabla VI muestran una fuerte concentración en calcular la vida útil remanente (RUL), aumentar la confiabilidad y disminuir el tiempo de inactividad no programada. Estos hallazgos evidencian la capacidad del mantenimiento predictivo para respaldar la toma de decisiones y mejorar la planificación del mantenimiento en operaciones mineras a cielo abierto.

Sin embargo, a pesar de los progresos informados, la mayor parte de las aportaciones todavía está en un nivel intermedio de madurez tecnológica, limitado a estudios de caso particulares y validaciones incompletas. Esto indica que, aunque las ventajas potenciales son evidentes, todavía existe una disparidad entre el desarrollo académico de modelos sofisticados y su aplicación sistemática en entornos industriales reales.

E. Implicancias para la mantenibilidad y gestión del mantenimiento

Desde una perspectiva de ingeniería, los resultados de esta revisión ponen de manifiesto que la efectividad de las estrategias de mantenimiento predictivo en palas mineras no depende únicamente de la técnica analítica empleada, sino también de factores relacionados con la mantenibilidad del equipo, la integración de sistemas de monitoreo y la gestión del mantenimiento. En este marco, varios estudios subrayan que la interacción entre variables operativas, organizacionales y técnicas es fundamental para el rendimiento general del sistema de mantenimiento. La Figura 4 representa de forma conceptual los factores más importantes que afectan la mantenibilidad de la maquinaria minera y sus interacciones, lo cual ofrece un marco de

referencia valioso para entender las perspectivas documentadas en la literatura.



Fig 4 Affecting factors on maintainability and their internal interactions[12]

F. Limitaciones recurrentes y vacíos de investigación

Las limitaciones identificadas en la literatura revisada evidencian una brecha persistente entre el desarrollo académico de modelos avanzados de mantenimiento predictivo y su implementación en entornos industriales reales. En particular, la transferencia de los resultados a actividades mineras reales se ve limitada por el hecho de que muchos estudios informan validaciones limitadas, basadas en conjuntos de datos experimentales, simulaciones o casos de estudio concretos. Además, se detectan problemas vinculados a la generalización de los modelos entre distintas palas, configuraciones y condiciones operativas, además de cuestiones que tienen que ver con la calidad, disponibilidad y representatividad de los datos, en particular cuando hay señales incompletas o ruidosas. Además, muchos métodos de aprendizaje profundo tienen restricciones en cuanto a la complejidad computacional y la interpretabilidad, lo que puede obstaculizar su implementación en situaciones industriales que necesitan soluciones robustas, eficaces y comprensibles.

Es importante enfatizar que estas propias limitaciones no debemos interpretarlas por sí mismas sino como fenómenos interrelacionados, en este caso, la escasa validación industrial coarta la posibilidad de poder evaluar la generalización de los modelos, y los problemas de calidad y disponibilidad de datos condicionan tanto el rendimiento predictivo como la interpretabilidad de las soluciones dadas. Así mismo, la elevada complejidad computacional de los modelos avanzados puede intensificar estas limitaciones puesto que aumenta las barreras técnicas y organizacionales que tienen lugar a la hora de implementar estos modelos en minas reales.

G. Implicancias para la investigación futura y la práctica en ingeniería minera

Para concluir, los estudios futuros deben enfocarse en el desarrollo de métodos que sean escalables e integrados, de acuerdo con los hallazgos de esta revisión. Estos procesos deben combinar varias fuentes de datos, tener en cuenta el sistema en su totalidad y dar prioridad a la validación en escenarios industriales reales. Además, es necesario avanzar hacia modelos que sean más comprensibles y eficaces desde

el punto de vista computacional, para que la industria minera pueda emplearlos y se logre una toma de decisiones más confiable e informada.

H. Implicaciones para la implementación industrial

Desde una perspectiva aplicada, la implementación de sistemas de mantenimiento predictivo en minería requiere no solo el desarrollo de modelos analíticos, sino también la integración con arquitecturas de datos industriales existentes, como sistemas SCADA, plataformas de monitoreo de condición y bases de datos históricas de mantenimiento.

Asimismo, la adopción de estas soluciones debe considerar aspectos económicos, incluyendo el costo de sensorización, almacenamiento de datos, procesamiento computacional y retorno de inversión asociado a la reducción del tiempo de inactividad y fallas críticas. En este contexto, uno de los principales desafíos identificados es la transición desde modelos desarrollados en entornos académicos hacia soluciones robustas y escalables que puedan ser implementadas en operaciones mineras reales.

I. Estrategias para superar las limitaciones identificadas

Para abordar las limitaciones relacionadas con la calidad de los datos, se sugiere la integración de múltiples fuentes de información (sensorial, operacional e histórica), así como el uso de técnicas de preprocesamiento y fusión de datos.

En relación con la generalización de modelos, es recomendable el desarrollo de enfoques transferibles, como el aprendizaje transferido (transfer learning) y modelos adaptativos que puedan ajustarse a diferentes condiciones operativas. Respecto a la interpretabilidad, se propone el uso de técnicas explicables (Explainable AI), que permitan comprender las decisiones de los modelos y facilitar su adopción en entornos industriales.

Finalmente, la validación industrial debe fortalecerse mediante colaboraciones entre academia e industria, así como la implementación de estudios piloto en condiciones reales de operación.

V. CONCLUSIÓN

El estado actual de la investigación acerca de los temas de mantenimiento predictivo, monitoreo de condición y detección de fallas en palas mineras utilizadas en operaciones a cielo abierto se examinó estructuralmente gracias a la revisión sistemática de la literatura. Se detectó una tendencia creciente a utilizar perspectivas que se basan en el aprendizaje automático, el procesamiento de señales y los métodos híbridos, que emplean sobre todo datos de vibración y registros operacionales; esto fue determinado a partir del análisis de 48 investigaciones escogidas siguiendo las pautas PRISMA. Los hallazgos muestran un enfoque significativo en la evaluación de la vida útil remanente, el aumento de la confiabilidad del equipo y la disminución del tiempo no planificado de inactividad. También se observa una concentración de estudios en subsistemas críticos y componentes estructurales de las palas mineras.

Sin embargo, la revisión también reveló vacíos e importantes restricciones de investigación, particularmente en lo que respecta a la validación industrial de los modelos, la generalización entre diferentes equipos y circunstancias operativas, así como la interpretabilidad de las soluciones avanzadas. En este escenario, se sugiere que las investigaciones posteriores se enfoquen en la creación de métodos escalables e integrados que unan diversas fuentes de datos, tomen en cuenta el sistema total de la pala minera y den prioridad a la validación en entornos industriales reales. Estos progresos favorecerán una implementación más eficaz del mantenimiento predictivo en el sector minero, así como una toma de decisiones más confiable e informada desde la óptica de la ingeniería.

Además, la incorporación de análisis costo-beneficio y modelos de adopción tecnológica será clave para facilitar la implementación efectiva de estas soluciones en la industria minera.

REFERENCE

- [1] O. Dayo-Olupona, B. Genc, T. Celik, and S. Bada, "Adoptable approaches to predictive maintenance in mining industry: An overview," *Resources Policy*, vol. 86, p. 104291, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2023.104291.
- [2] L. Rojas, Á. Peña, and J. Garcia, "AI-Driven Predictive Maintenance in Mining: A Systematic Literature Review on Fault Detection, Digital Twins, and Intelligent Asset Management," Mar. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app15063337.
- [3] A. Ahmed Murtaza, A. Saher, M. Hamza Zafar, S. Kumayl Raza Moosavi, M. Faisal Aftab, and F. Sanfilippo, "Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study," Dec. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2024.102935.
- [4] W. Mwale, Z. Liu, and K. Chipusu, "A Hybrid AI Framework for Integrated Predictive Maintenance and Mineral Quality Assessment in Mining," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 22, Nov. 2025, doi: 10.3390/app152212222.
- [5] H. Ding, L. Yang, and Z. Yang, "A predictive maintenance method for shearer key parts based on qualitative and quantitative analysis of monitoring data," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 108684–108702, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2933676.
- [6] S. Ji, W. Li, Y. Wang, B. Zhang, and S. K. Ng, "A Soft Sensor Model for Predicting the Flow of a Hydraulic Pump Based on Graph Convolutional Network–Long Short-Term Memory," *Actuators*, vol. 13, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/act13010038.
- [7] Q. Zhang, Z. Wu, B. An, R. Sun, and Y. Cui, "Digital Twin-Based Technical Research on Comprehensive Gear Fault Diagnosis and Structural Performance Evaluation," *Sensors*, vol. 25, no. 9, May 2025, doi: 10.3390/s25092775.
- [8] X. Liu, X. Qi, and Y. Jiang, "Electric Shovel Teeth Missing Detection Method Based on Deep Learning," *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6503029.
- [9] V. I. Knyazkina, K. A. Safronchuk, and S. L. Ivanov, "About possibility of immediate evaluation of technical condition of mining equipment using signal value of acoustic emission friction," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012068.
- [10] N. A. Korolev and S. V. Solovev, "AC motor diagnostics system based on complex parametric analysis," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Mar. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012007.
- [11] A. V. Kudrevatykh, A. S. Ashcheulov, and A. S. Ashcheulova, "Actual technical condition assessment of mine excavators' slewing gear based on the operating oil parameters," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/537/3/032033.
- [12] M. R. Dashtaki, A. J. Jafari, and S. H. Hoseinie, "Development of a new method for maintainability and downtime analysis of mining machinery," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-88505-3.
- [13] M. Y. Drygin and N. P. Kuryshkin, "Diagnostics of heavy mining equipment during the scheduled preventive maintenance," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Jan. 2018. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012028.
- [14] M. Drygin and N. Kuryshkin, "Improving the Repair Planning System for Mining Equipment on the Basis of Non-destructive Evaluation Data," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Nov. 2017. doi: 10.1051/e3sconf/20172103011.
- [15] S. L. Ivanov and P. V. Shishkin, "Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Oct. 2017. doi: 10.1088/1755-1315/87/2/022009.
- [16] D. S. Gromyka, K. V. Gogolinsky, E. K. Shchiptsova, and V. V. Alekhovich, "Possibility Evaluation of Monitoring Areas of Local Plastic Deformation During Fatigue Wear of Metal Structures Using the Dynamic Instrumented Indentation Method," *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, vol. 39, no. 1, pp. 104–111, Jan. 2026, doi: 10.5829/ije.2026.39.01a.09.
- [17] S. Chen, B. F. Rolfe, J. Griffin, A. Delli Carri, P. Lu, and M. P. Pereira, "A Novel Condition Monitoring Technique for Mining Ground Engagement Tools via Modal Analysis," *Eng.*, vol. 6, no. 9, Sep. 2025, doi: 10.3390/eng6090220.
- [18] B. L. Gerike and A. A. Mokrushev, "Diagnostics of the Technical State of Bearings of Mining Machines Base Assemblies," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute

- of Physics Publishing, Oct. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/253/1/012012.
- [19] F. Zhang, M. Weng, G. Su, P. Shi, Z. Li, and Y. Teng, "Research on the Application of Intelligent Diagnosis of Major Equipment Failures in Coal Mines," *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.2478/amns-2024-2648.
- [20] P. Gerike and B. Gerike, "Selecting the criterion for diagnosing imbalance of electric mining shovel rotors," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Oct. 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202131503025.
- [21] P. B. Gerike and V. I. Klishin, "Vibration analysis of electromechanical equipment of mining shovels," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/262/1/012020.
- [22] P. Krot, V. Korennoi, and R. Zimroz, "Vibration-based diagnostics of radial clearances and bolts loosening in the bearing supports of the heavy-duty gearboxes," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 24, pp. 1–20, Dec. 2020, doi: 10.3390/s20247284.
- [23] O. Gölbaşı and N. Demirel, "A cost-effective simulation algorithm for inspection interval optimization: An application to mining equipment," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 113, pp. 525–540, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.09.002.
- [24] P. Sokolski and T. Smolnicki, "A method for monitoring the technical condition of large-scale bearing nodes in the bodies of machines operating for extended periods of time," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 20, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206637.
- [25] D. Jana, D. Kumar, S. Gupta, S. Pal, and S. Ghosh, "Bayesian Network Approach for Studying the Operational Reliability and Remaining Useful Life," *Journal of Reliability and Statistical Studies*, vol. 16, no. 2, pp. 373–390, 2023, doi: 10.13052/jrss0974-8024.16210.
- [26] D. Pietrusiak, "Evaluation of large-scale load-carrying structures of machines with the application of the dynamic effects factor," *Eksploatacja i Niezawodnosc*, vol. 19, no. 4, pp. 542–551, 2017, doi: 10.17531/ein.2017.4.7.
- [27] M. Martinsen, A. D. Fentaye, E. Dahlquist, and Y. Zhou, "Holistic Approach Promotes Failure Prevention of Smart Mining Machines Based on Bayesian Networks," *Machines*, vol. 11, no. 10, Oct. 2023, doi: 10.3390/machines11100940.
- [28] D. Pietrusiak, P. Moczko, T. Smolnicki, and E. Rusiński, "Identification of low cycle dynamic loads acting on heavy machinery," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 254–259. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.017.
- [29] J. B. Toshov *et al.*, "Methods for Analysis and Improvement of Dynamic Loads on the Steel Wire Rope Holding the Boom of Steel Wire Rope Excavators," *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, vol. 339, no. 4, pp. 87–96, May 2026, doi: 10.31643/2026/6445.43.
- [30] U. Bugarić, R. Jovanović, M. Tanasijević, and S. Djenadić, "Prediction of technical systems availability using the simulation models based on the AI techniques and statistical methods. A case study: Bucket wheel excavator," *Results in Engineering*, vol. 27, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106692.
- [31] R. N. Safiullin, A. F. Zalyubovskiy, R. R. Safiullin, K. V. Sorokin, and S. Y. Avksentiev, "An Algorithm to Process Big Data of Remote Technical Condition Assessment System for Mining Machines," *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, vol. 39, no. 3, pp. 613–622, Mar. 2026, doi: 10.5829/ije.2026.39.03c.05.
- [32] S. Senses and M. Kumral, "An optimization-based approach to fleet reliability and allocation in open-pit mining," *Decision Analytics Journal*, vol. 15, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.dajour.2025.100583.
- [33] M. Mirzehi Kalateh Kazemi, Z. Nabavi, M. Rezakhah, and A. Masoudi, "Application of XGB-based metaheuristic techniques for prediction time-to-failure of mining machinery," *Systems and Soft Computing*, vol. 5, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.sasc.2023.200061.
- [34] N. Gnjatović, S. Bošnjak, and A. Stefanović, "Analysis of the Dynamic Response as a Basis for the Efficient Protection of Large Structure Health Using Controllable Frequency-Controlled Drives," *Mathematics*, vol. 11, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/math11010154.
- [35] A. Taghizadeh and N. Demirel, "Application of Machine Learning for Dragline Failure Prediction."
- [36] P. Stefaniak, M. Wodecki, and A. Michalak, "Association rules discovery from diagnostic dataapplication to gearboxes used in mining industry," in *Vibroengineering Procedia*, EXTRICA, Sep. 2017, pp. 103–108. doi: 10.21595/vp.2017.19082.
- [37] I. Milenović, S. Bošnjak, N. Gnjatović, and A. Obradović, "Bucket wheel excavators with a kinematic breakdown system: Identification and monitoring of the basic parameters of static stability of the slewing superstructure," *Eksploatacja i Niezawodnosc*, vol. 24, no. 2, pp. 359–370, 2022, doi: 10.17531/ein.2022.2.17.
- [38] X. Xue *et al.*, "Cross-Media Infrared Measurement and Temperature Rise Characteristic Analysis of Coal Mine Electrical Equipment," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 19, Oct. 2025, doi: 10.3390/en18195122.
- [39] D. Kondyla, F. Pavloudakis, I. Kapageridis, G. Barakos, C. Roumpos, and Z. Agioutantis, "EFFECTIVENESS OF CONTINUOUS SURFACE MINING SYSTEMS: LESSONS LEARNED FROM SIX DECADES OF LIGNITE EXTRACTION IN WESTERN MACEDONIA, GREECE," *Archives of Mining Sciences*, vol. 70, no. 2, pp. 183–204, 2025, doi: 10.24425/ams.2025.154658.
- [40] V. A. Florea and M. Toderaş, "Efficiency of Maintenance Activities in Aggregate Quarries: A Case Study of Wear Parts on

- Loaders and Excavators,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.3390/app14177649.
- [41] H. Guan, R. Yan, H. Tang, and J. Xiang, “Intelligent Fault Diagnosis of Hydraulic Multi-Way Valve Using the Improved SECNN-GRU Method with mRMR Feature Selection,” *Sensors*, vol. 23, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/s23239371.
- [42] R. Djurić and V. Milisavljević, “Investigation of the relationship between reliability of track mechanism and mineral dust content in rocks of lignite open pits,” *Eksploracija i Niezawodnosc*, vol. 18, no. 1, pp. 142–150, 2016, doi: 10.17531/ein.2016.1.19.
- [43] D. Arsić, R. R. Nikolić, A. Arsić, D. Cvetković, J. Pastorková, and O. Bokuvka, “Measures to prevent damage and to extent the service life of a rotary excavator,” *Production Engineering Archives*, vol. 31, no. 1, pp. 73–80, Mar. 2025, doi: 10.30657/pea.2025.31.7.
- [44] J. Wodecki, R. Zdunek, A. Wylomańska, and R. Zimroz, “Nonnegative factorization of spectrogram for local damage detection of belt conveyor gearboxes,” in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Jul. 2017, pp. 4714–4718. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.859.
- [45] N. Chambi *et al.*, “Predictive Maintenance in Underground Mining Equipment Using Artificial Intelligence,” *Eng*, vol. 6, no. 10, Oct. 2025, doi: 10.3390/eng6100261.
- [46] N. Demirel and O. Gölbasi, “Preventive replacement decisions for dragline components using reliability analysis,” *Minerals*, vol. 6, no. 2, Jun. 2016, doi: 10.3390/min6020051.
- [47] D. Branković, Z. Milovanović, and V. Janićić-Milovanović, “Reliability Analysis of Bucket-Wheel Excavator Parts - Application of Critical Position Selection Algorithm,” *Journal of Web Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 1–30, 2025, doi: 10.13052/jgeu0975-1416.1311.
- [48] S. Djenadic, M. Tanasijevic, P. Jovancic, D. Ignjatovic, D. Petrovic, and U. Bugaric, “Risk Evaluation: Brief Review and Innovation Model Based on Fuzzy Logic and MCDM,” *Mathematics*, vol. 10, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/math10050811.
- [49] S. M. Radu, F. Vilceanu, M. Todaras, and S. Dinescu, “Spectral and Wavelet Analysis in the Assessment of the Impact of Corrosion on the Structural Integrity of Mining Equipment,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2024, doi: 10.3390/app14167385.
- [50] V. Barat *et al.*, “Structural health monitoring of walking dragline excavator using acoustic emission,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 8, Apr. 2021, doi: 10.3390/app11083420.
- [51] B. Chazy and P. Pawlik, “THE USE OF A NAIVE BAYES CLASSIFIER IN CONTINUOUS MONITORING SYSTEMS FOR ROTATING MACHINERY,” *Diagnostyka*, vol. 26, no. 3, 2025, doi: 10.29354/diag/209804.