Uso de monitoreo remoto y AI para optimizar disponibilidad de bombas de desplazamiento positivo

Unai Gamboa[1], **Alexander Janzon**[2], **Jorge Guerrero**[3] y **Nicolás Ponce**[4]

1 Sales Director Mining, ABEL GmbH, España
2 Product Management Team Lead, ABEL GmbH, Alemania
3 Regional Sales Manager, ABEL GmbH, España
4 Process & Product Manager, Grupo Tecfluid, Chile

RESUMEN

Las bombas de pistón-diafragma cumplen un rol crítico en el transporte de relaves de alta densidad, pero sus componentes en contacto con material abrasivo exigen mantenimiento frecuente y detenciones de diagnóstico por apertura. ABEL desarrolló un sistema de monitoreo remoto que adquiere señales de seguridad y de seguimiento operacional cada tres minutos y las analiza mediante un modelo de aprendizaje semi-supervisado entrenado con más de 40.000 sets de datos de casos reales. El modelo asigna cada set a una etiqueta pre-entrenada, distingue fallas por evento de fallas por desgaste y, en estas últimas, calcula el tiempo operativo remanente hasta el umbral crítico, con anticipación de hasta 21 días. En el caso documentado —bomba dúplex de doble efecto de 130 m³/h en faena subterránea con relleno en pasta— la rutina preventiva tras el relleno de un caserón se redujo de 24 horas a menos de 3 horas. Se presentan la distribución de patrones de la base etiquetada, la salida del clasificador en dos estados del mismo equipo, los límites de validez del horizonte predictivo y el alineamiento con el artículo 423 del Decreto Supremo N.º 034-2023-EM.

Palabras clave: bombas de desplazamiento positivo, pistón-diafragma, monitoreo remoto, inteligencia artificial, mantenimiento predictivo, relaves.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de bombas de desplazamiento positivo (bombas PD) está ampliamente establecido en la gestión de relaves: su principio de operación es el más adecuado para manejar altos contenidos de sólidos y relaves de alta densidad. Siendo la gestión de relaves esencial para una producción confiable, el equipo que la ejecuta exige un monitoreo acorde con esa criticidad.

ABEL desarrolló un sistema de monitoreo para predecir fallas y asegurar el mantenimiento preventivo, sobre el cual implementó inteligencia artificial para planificar las tareas. Este trabajo describe su arquitectura, las condiciones de servicio del caso documentado, la salida del clasificador, los resultados sobre base instalada real, los límites de validez de la predicción y el alineamiento con el marco normativo peruano.

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la bomba de pistón-diafragma

Un motor eléctrico acoplado a un reductor transmite el movimiento a los engranajes principales, transformando el giro en desplazamiento longitudinal de los pistones. Estos desplazan el fluido hidráulico, que acciona los diafragmas contenidos en la cámara de producto, permitiendo succionar e impulsar el relave. Los pistones trabajan de forma alternada para asegurar flujo continuo y los amortiguadores reducen las pulsaciones en la línea de descarga.

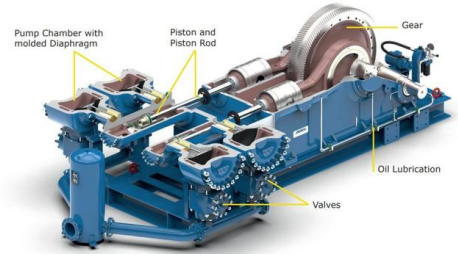

Figura 2.1 Sección de una bomba de pistón-diafragma

2.2 Fallas y mantenimiento de la bomba

Los componentes en contacto directo con el relave abrasivo concentran el desgaste, por lo que el lado producto es el que se inspecciona con mayor frecuencia. La rutina comprende la inspección de válvulas y asientos —cuatro en succión y cuatro en descarga—, el alojamiento y la condición de los diafragmas y, con menor frecuencia, el lado hidráulico; toma entre 24 y 48 horas. Ante una pérdida de eficiencia por partícula sobredimensionada la bomba debe detenerse: abrir secuencialmente las válvulas de retención tiene sólo 8 a 16 % de probabilidad de acertar al primer intento, y localizarla puede extender el proceso hasta dos horas.

2.3 Sistema de monitoreo

El sistema sustituye la inspección por apertura: el usuario evalúa la condición y el desgaste de cada componente del lado producto, hidráulico y de accionamiento sin abrir el equipo. Las señales se agrupan en dos conjuntos:

- Señales de seguridad: protegen al equipo frente a temperatura y presión excesivas y ante rotura de diafragma. Operan como enclavamientos permisivos para la operación o no operación de la bomba.
- Señales de seguimiento operacional: individualizan el desempeño de cada alojamiento mediante sensores de desplazamiento y de presión, con carácter informativo.

Un gateway transmite la información a la nube cada 3 minutos —cadencia limitada por el volumen de datos— por conexión cableada o tarjeta SIM, y queda disponible en computador, tablet o smartphone desde cualquier lugar. En la Figura 2.2 las señales de seguridad se muestran en el gráfico inferior y las individualizadas de cada alojamiento en los dos superiores; el ejemplo es una bomba dúplex de doble efecto con cuatro lados de diafragma.



Figura 2.2 Interfaz de usuario del sistema de monitoreo remoto

2.4 Condiciones de servicio del caso documentado

Los resultados de la sección 3 provienen de una faena subterránea con relleno en pasta de caserones. La Tabla 2.1 define la ventana de servicio en que se obtuvieron: fuera de ella, el comportamiento del indicador de desgaste y el horizonte de predicción deben revalidarse.

Tabla 2.1 Condiciones de servicio del caso documentado

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Caudal del caso	130 m³/h	Rango de caudal	50 – 200 m³/h
Presión descarga, base	60 bar	Presión máx. línea	15 MPa (150 bar)
Presión de bloqueo	130 bar	Consistencia	slump Boger 30–60 mm
Configuración equipo	dúplex doble efecto	Válvulas en inspección	4 succión + 4 descarga
Lados de diafragma	4	Cadencia de datos	3 minutos

Fuente: elaboración propia a partir de Gamboa et al. (2025).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Analítica y recomendación de acción basadas en inteligencia artificial

La IA analiza los datos entrantes cada tres minutos, entrega diagnóstico automático e instrucción de acción en una aplicación móvil y estratifica esa comunicación entre mantenedor, supervisor y gerencia. El modelo distingue fallas por evento —resolución inmediata, sin indicación previa— de fallas por desgaste, que siguen una tendencia degradante y permiten predecir el tiempo operativo remanente. El aprendizaje es semi-supervisado sobre más de 40.000 sets de datos reales, complementados con datos artificiales y con el etiquetado continuo de nuevos casos. La Tabla 3.1 lista las fallas ya reconocidas.

Tabla 3.1 Fallas identificables por el sistema de inteligencia artificial

Falla por desgaste	Falla por evento
Desgaste de válvula de descarga	Presión de succión demasiado baja
Desgaste de válvula de succión	Bloqueo de tubería de descarga
Sedimentación en tubería de succión	Bajo desempeño del amortiguador de pulsación
Sedimentación en tubería de descarga	Bloqueo de válvula de succión o de descarga
	Funcionalidad del control hidráulico

Fuente: elaboración propia a partir de Gamboa et al. (2025).

3.2 Distribución de patrones y salida del clasificador

La Figura 3.1a presenta la composición de la base de casos etiquetados sobre la que opera el modelo. El 60 % de los sets corresponde a operación normal: el sistema no sólo detecta anomalías, también certifica condición sana, lo que sostiene la decisión de no intervenir. El 40 % restante son desviaciones tipificadas que antes permanecían invisibles hasta la inspección por apertura.

La Figura 3.1b compara la salida del clasificador en dos estados del mismo equipo. En condición normal la etiqueta «operación normal» recibe 0,905 y el resto permanece en el orden de 0,01. Diez días después, ante un bloqueo de válvula de succión en la cámara 4 por partículas fuera de especificación, la etiqueta dominante se desplaza a «bloqueo de válvula de succión» con 0,889, sin ambigüedad que interpretar en terreno; la intervención confirmó físicamente la válvula obstruida. Sin intervención, esta falla por evento deriva en rotura de diafragma.

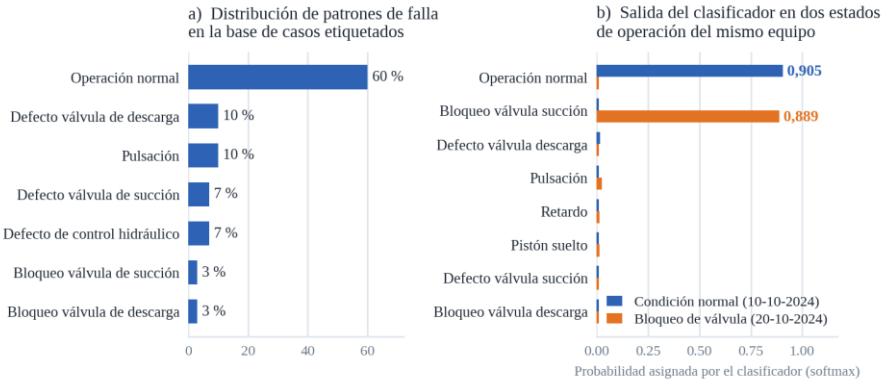

Figura 3.1 (a) Distribución de patrones en la base de casos etiquetados. (b) Salida del clasificador en dos estados de operación del mismo equipo.

3.3 Predicción de fallas por desgaste

Cuando la IA detecta desgaste activa algoritmos que calculan el tiempo operativo remanente hasta que el desempeño del componente alcanza un umbral crítico, punto en que su eficiencia está comprometida y cercana al límite de operación segura; así ha predicho fallas por desgaste con hasta 21 días de anticipación. En abrasión típica por alta concentración de finos el indicador crece de forma gradual y continua (Figura 3.2) y existe ventana para planificar; el material extraño fuera de receta produce un alza casi vertical, de impacto inmediato y sin ventana.

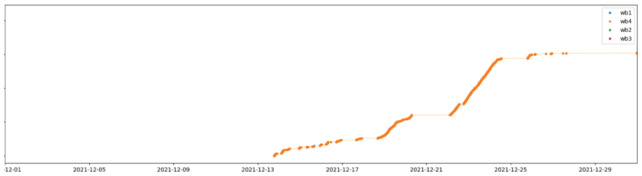

Figura 3.2 Incremento del colectivo de carga como indicador de desgaste y de su intensidad

3.4 Integración con los procesos de mantenimiento

El sistema desplaza el gatillo de intervención desde el calendario o la falla consumada hacia la condición real y la tendencia modelada: convierte el mantenimiento de la bomba en una variable planificable de la operación (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Integración del monitoreo con los procesos de mantenimiento

Dimensión	**Mantenimiento tradicional**	**Monitoreo remoto con IA**
Gatillo de intervención	Calendario o falla consumada	Condición real y tendencia modelada
Rutina preventiva	24 – 48 h de trabajo completo	Menos de 3 h, dirigida al componente
Diagnóstico de eficiencia	Hasta 2 h abriendo válvulas	Cámara y causa sin abrir la bomba
Latencia del dato	Inspección presencial programada	3 minutos, acceso remoto
Horizonte de planificación	Nulo: se reacciona al síntoma	Hasta 21 días de anticipación

Fuente: elaboración propia a partir del caso documentado en Gamboa et al. (2025).

3.5 Límites de predicción y condiciones de validez

El alcance predictivo tiene fronteras explícitas, cuyo reconocimiento es parte del diseño del plan de mantenimiento:

- El horizonte de hasta 21 días aplica a fallas por desgaste con tendencia monótona; las fallas por evento se diagnostican, no se predicen. La cadencia de 3 minutos fija la resolución temporal: lo más rápido se registra como condición ya consumada.
- La salida del clasificador mide similitud con casos etiquetados, no probabilidad de falla. Un modo no representado en la base no se reconoce: se manifiesta como pérdida de confianza en todas las etiquetas.

- El horizonte efectivo depende de la reología del relave, la concentración de finos y la presencia de material fuera de receta: fuera de la ventana de la Tabla 2.1 debe revalidarse.
- La predicción no sustituye la inspección: define su oportunidad y su alcance.

4. ALINEAMIENTO CON EL MARCO NORMATIVO PERUANO

El Decreto Supremo N.º 034-2023-EM, publicado el 30 de diciembre de 2023, incorpora al Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería el Capítulo XII, «Gestión de Depósitos de Relaves» (artículos 418 a 423). Su artículo 423 exige un sistema de suspensión automática del bombeo ante fugas de relaves en las líneas de conducción. Las señales de seguridad de la sección 2.3 —rotura de diafragma, presión y temperatura excesivas— operan como enclavamientos permisivos que detienen la bomba: es la función que el artículo exige, resuelta en el propio equipo y no en un sistema añadido.

El mismo capítulo aporta exigencias que el monitoreo continuo contribuye a satisfacer: el artículo 422 obliga a suspender la descarga ante filtraciones, agrietamientos, borde libre insuficiente o arrastre de sólidos, decisión que requiere evidencia; el artículo 419 exige que el plan de emergencias contemple los sistemas de detección de anomalías; y los artículos 418 y 421 exigen programa de monitoreo y Plan de Gestión, para los cuales el registro continuo entrega trazabilidad verificable. Complementariamente, la Ley N.º 31211 y su Reglamento (DS N.º 031-2023-EM) exigen protección en el transporte de relaves y contingencia ante fugas y derrames.

5. CONCLUSIONES

- La bomba PD es un equipo de rol crítico: reducir su mantenimiento y su tiempo fuera de servicio es determinante para la continuidad operacional.
- El diagnóstico por IA define la situación y la acción antes de la falla, sin abrir el equipo: la rutina preventiva pasó de 24 horas a menos de 3 horas. La certificación de condición sana —60 % de la base etiquetada— sostiene con evidencia la decisión de no intervenir.
- El modelado predictivo habilita la planificación con hasta 21 días de anticipación en fallas por desgaste, dentro de la ventana de servicio y de los límites de la sección 3.5.
- La detención automática ante fuga en la línea de conducción, exigida por el artículo 423 del DS N.º 034-2023-EM, queda resuelta por los enclavamientos del propio equipo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los clientes su participación activa y su apoyo durante el aprendizaje del sistema.

REFERENCIAS

ABEL GmbH. (2023). Manual de operación y mantenimiento de bombas HMD. ABEL GmbH.

Gamboa, U., Janzon, A., Guerrero, J., & Ponce, N. (2025). Use of remote monitoring and Artificial Intelligence to optimize piston-diaphragm pumps availability. En Proceedings of Tailings 2025, 11th International Congress on Tailings Management. Gecamin.

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2023a). Decreto Supremo N.º 031-2023-EM, Reglamento de la Ley N.º 31211. Diario Oficial El Peruano.

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2023b). Decreto Supremo N.º 034-2023-EM, que incorpora el Capítulo XII, Gestión de Depósitos de Relaves, al Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Diario Oficial El Peruano.