

"Estrategias de control Híbridas en Control Avanzado para la optimización – casos de éxitos y nuevas oportunidades"

Camilo Fierro, SGS Advanced Systems
Benjamín Olivares, SGS Advanced Systems
Advanced Systems, Natural Resources, SGS Chile, Santiago, Chile

1. Introducción

El constante crecimiento de la industria minera, sumado a la inevitable disminución en las leyes de cabeza debido al agotamiento progresivo de los yacimientos, plantea desafíos complejos que exigen una mayor versatilidad en la definición de estrategia de optimización para el control avanzado de procesos (APC). (Olivares, Navia, Quintanilla, & Araya, 2025)

Históricamente, la lógica difusa implementada en sistemas expertos ha sido una herramienta clave en diversas etapas del procesamiento de minerales para proteger, estabilizar y optimizar las operaciones (Guobin Zou, 2023). Los casos de éxito de esta herramienta de modelación radican en la capacidad de integrar formalmente el conocimiento heurístico de ingenieros, metalurgistas y operadores, consolidando estrategias de control robustas orientadas a, por ejemplo, maximizar la ley de concentrado y la recuperación metalúrgica en procesos (Dawson & Koorts, 2014), así como otros indicadores claves del proceso.

No obstante, la reciente evolución hacia paradigmas como el control predictivo basado en modelos (MPC), gemelos digitales y la inteligencia artificial ha impulsado una transformación digital que depende críticamente de infraestructuras en la nube y una densa red de instrumentación con baja incertidumbre. Esta exigencia tecnológica eleva los costos de operación marginando aquellas operaciones mineras que aún no alcanzan dicho estándar de digitalización (Vazirizadeh & Brooks, 2023). Bajo este escenario, los sistemas expertos se mantienen como una alternativa altamente competitiva, capaz de operar eficientemente con la instrumentación y capacidad computacional instalada. A partir de esta base, se abren nuevas oportunidades de desarrollo de estrategias de control híbridas que combinen la lógica difusa tradicional -que permite proteger y controlar eficientemente los procesos de forma segura- junto con una capa de optimización más precisa mediante modelos fenomenológicos, algoritmos de machine learning o estrategias predictivas. De este modo, es posible mantener la plataforma original, y potenciar la capacidad de optimización para asimilar las complejidades operacionales de la minería moderna.

El presente trabajo presenta casos de éxito de la implementación de estrategias de control híbridas de APC. Esto es una capa de control basados en modelos, cuya operación está regulada por una capa base del APC que es un sistema experto basado en reglas y lógica difusa. La definición de estados operacionales y restricciones en tiempo real, permiten dar paso a ajustes en los modelos o su lógica de control, impactando en la estrategia de control general del APC.

2. Descripción de la solución

La solución propuesta se basa en la modularización de la estrategia de control, manteniendo intacta la estructura base de lógica difusa y booleana, la cual opera en capas

secuenciales y jerárquicas dedicadas exclusivamente a la protección y estabilización del sistema. Bajo este esquema, la componente híbrida consiste en un módulo de optimización basado en modelos que actúa sobre escenarios operacionales específicos, enfocándose en la eficiencia de recursos. Dado que el sistema opera en estados bien identificados por la capa basal, es posible aprovechar la estabilidad histórica de estos entornos para adecuar los modelos a condiciones y restricciones predefinidas. Así, mediante la evaluación offline de datos históricos, se construyen modelos base que, al operar en condiciones acotadas, reducen significativamente el requerimiento de procesamiento computacional en tiempo real en comparación con el uso de modelos generalizados.

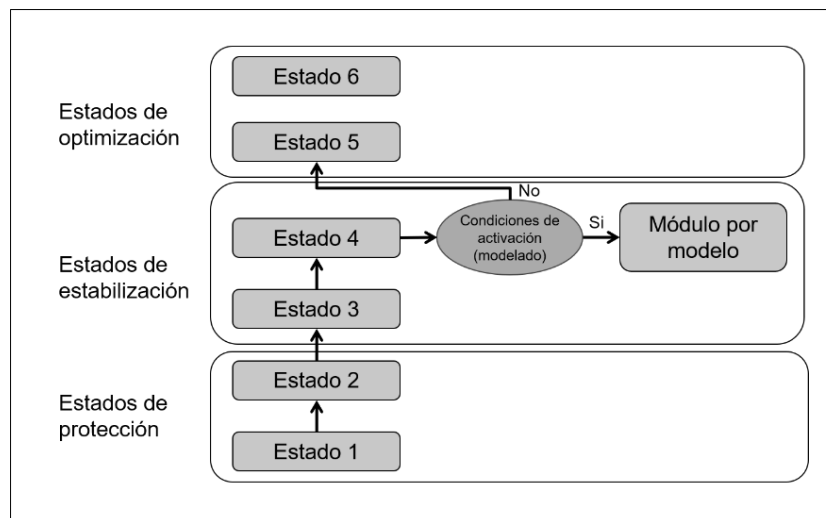


Figura 2-1: Jerarquía de módulos.

Dentro de los desarrollos implementados bajo este enfoque, se destaca en este trabajo dos implementaciones para la optimización de la operación del APC en molinera semi-autógena (SAG):

1. Optimización de la operación de un molino mediante la estimación dinámica y en línea de su punto de sobrecarga a través del análisis de la curva potencia-volumen.

La estrategia busca operar estimando el punto de sobrecarga dentro de la curva de operación (Chrysosoulis, Stowe, & Reich, 1992), basado en que la curva general pueda ser actualizada según la información de operación más reciente.

Esto entrega adaptabilidad al APC, que actualiza la metodología de evaluación de la operación y sus acciones de control, según una curva de potencia-presión construida de manera dinámica con datos reales, confiables y recientes.

2. Optimización del uso agua en la operación, mediante el aumento del porcentaje de sólidos usando un algoritmo dedicado que integra técnicas de machine learning.

El módulo se basa en un modelo random-forest, que utiliza información operacional reciente y un modelo base para predecir puntos de operación futuros. El algoritmo de optimización busca las condiciones de operación que reduzcan el uso de agua en la operación, asegurando mantener condiciones de estabilidad y protección según las evaluaciones basales del sistema experto.

3. Ventajas de implementación

La implementación de esta estrategia modular híbrida ofrece múltiples ventajas que vuelven altamente competitiva los sistemas expertos híbridos:

- **Bajo consumo de memoria y recursos:** La solución se ejecuta directamente sobre el entorno y lenguaje de programación de sistemas experto MET ya existente. Al no requerir servidores adicionales ni infraestructuras externas complejas, se optimiza el uso de los activos computacionales de la planta.
- **Alta confiabilidad operacional:** Al mantener la base heurística del sistema experto, el sistema existente actúa como una red de seguridad. La implementación del control por modelos se hace en condiciones controladas, permitiendo entregar confiabilidad y certeza sobre la estrategia de control y automatización realizada. La jerarquía de control ampliada absorbe con robustez la variabilidad de los regímenes de operación, asegurando que el proceso se mantenga siempre dentro de los rangos de restricción definidos.
- **Versatilidad y adaptabilidad operativa:** El sistema optimiza la infraestructura computacional e instrumental ya existente en la operación, evitando inversiones adicionales en hardware. Su arquitectura es inherentemente escalable, permitiendo transitar desde modelos de control simples hasta algoritmos avanzados de *machine learning*. Esta flexibilidad se complementa con una capacidad de evaluación en tiempo real que permite actualizar dinámicamente los parámetros críticos y ajustar el sistema experto basándose en información operativa reciente y confiable.
- **Eficiencia operacional cuantificable:** Impacta directamente en los KPI del negocio, demostrando incrementos sostenidos en el tonelaje de tratamiento y una reducción sistemática en el consumo de agua de la operación.

4. Resultados

La evaluación de cada solución se fundamenta en sus respectivos KPIs. En el caso del modelo de optimización del punto de sobrecarga para un molino SAG, se implementó una curva de potencia sobre presión que permite estimar el grado de llenado en tiempo real. Esta metodología define zonas operativas precisas, maximizando la eficiencia de molienda sin comprometer la integridad del activo al evitar condiciones críticas.

Dicho modelo integra estrategias de optimización de mínimos cuadrados aplicadas a una función de costo dinámica, ajustada continuamente durante la operación. Los resultados permiten analizar el comportamiento del equipo, facilitando la evaluación del impacto en el aumento del procesamiento y el uso eficiente de la capacidad instalada. El beneficio más significativo ha sido el incremento sustancial en el tratamiento de mineral.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en dos equipos de características similares.

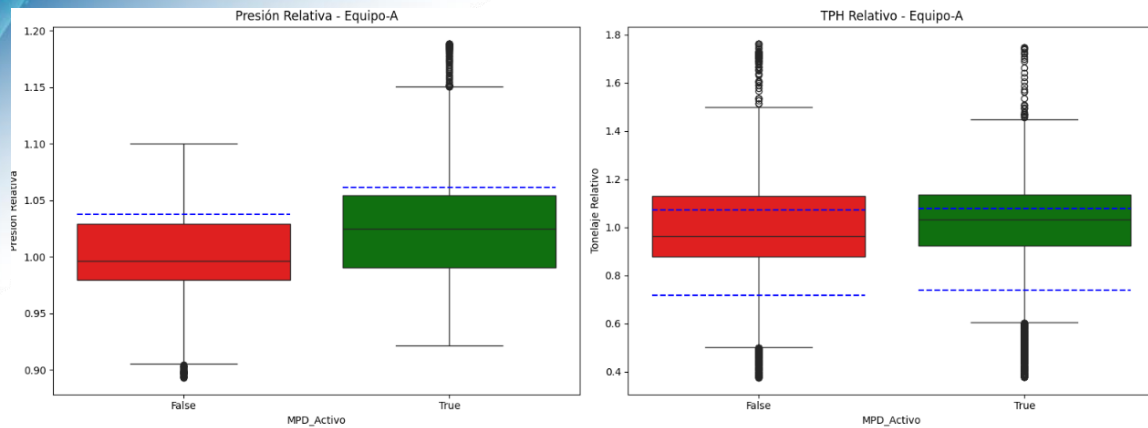


Figura 4-1: Resultados optimizador de sobrecarga Presión y Tonelaje Equipo A. (Elaboración propia)

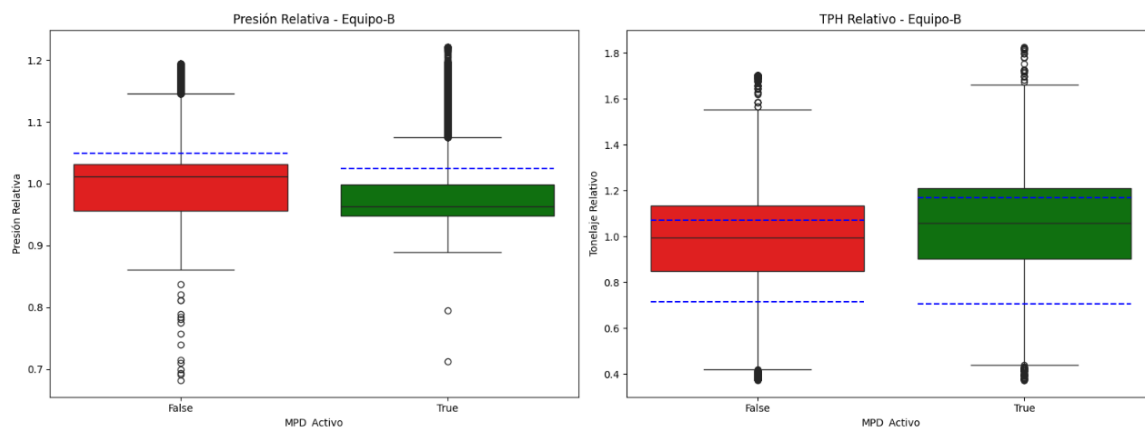


Figura 4-2: Resultados optimizador de sobrecarga Presión y Tonelaje Equipo B. (Elaboración propia)

	Molino SAG - Equipo A	Molino SAG - Equipo B
Incremento TPH	6.00 %	2.01 %
Variación Presión	- 2.09 %	2.20 %
Utilización	55.5 %	61.8 %

Tabla 1: Resultados de la implementación de optimizador de tonelaje. (Elaboración propia)

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de la optimización del punto de sobrecarga en el molino SAG permitió elevar el tratamiento de manera significativa, maximizando el aprovechamiento de la capacidad instalada. Cabe destacar que esta estrategia no solo optimiza el volumen operativo del equipo, sino que garantiza una gestión eficiente del proceso de molienda.

Por otro lado, se evaluó la optimización del porcentaje de sólidos, orientada a mejorar la gestión del recurso hídrico. El objetivo de este modelo de control es reducir el consumo de agua específico (m^3/t) y, simultáneamente, incrementar la eficiencia de molienda, manteniendo el equipo en su punto óptimo de operación sin exceder las condiciones críticas de diseño.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para dos equipos de características similares.

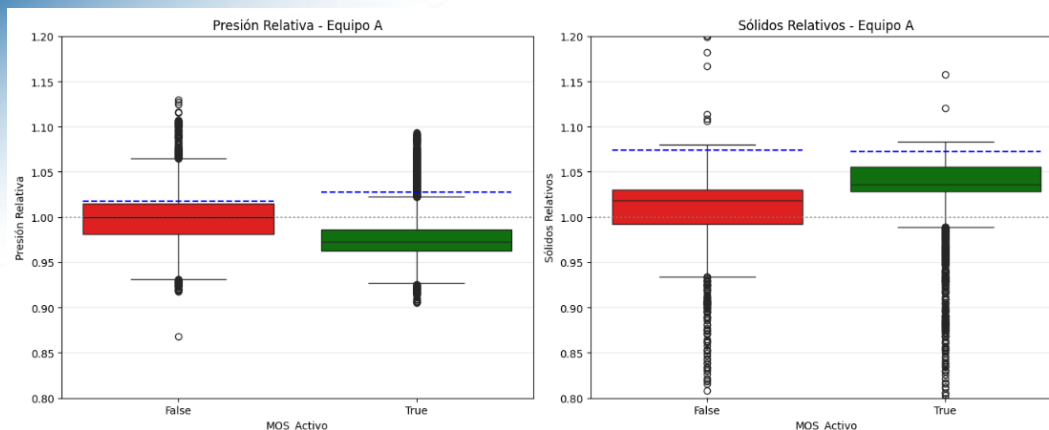


Figura 4-3: Resultados optimizador de solidos Equipo A. (Elaboración propia)

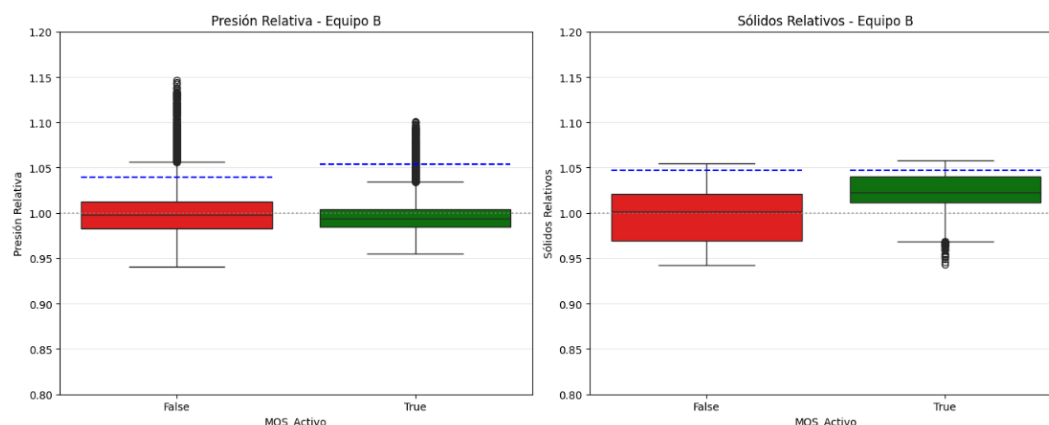


Figura 4-4: Resultados optimizador de solidos Equipo B. (Elaboración propia)

	Molino SAG - Equipo A	Molino SAG - Equipo B
Mejora % sólidos	0.35 %	2.44 %
Disponibilidad modelo	46.34 %	53.76 %
Reducción de agua	6.76 %	6.24 %

Tabla 2: Resultados de la implementación de optimizador de porcentaje de sólidos (Elaboración propia).

Los resultados reflejan el impacto de la optimización del porcentaje de sólidos en el molino SAG, logrando un incremento significativo en este parámetro de control. La estrategia implementada no solo favorece el uso eficiente de la capacidad instalada, sino que permite elevar el valor promedio del porcentaje de sólidos y, fundamentalmente, reducir su variabilidad operativa. Este enfoque asegura un uso óptimo del recurso hídrico y garantiza la calidad del producto final, manteniendo en todo momento la estabilidad del proceso sin comprometer la integridad del activo.

5. Conclusiones

La implementación de estrategias de APC híbridas representa una alternativa efectiva para incrementar el beneficio operacional de sistemas de control avanzado existentes, manteniendo una condición operacional estable y confiable. En los casos presentados, la incorporación de modelos de optimización entrega mejoras promedio del orden de 6% en los indicadores de interés (tonelaje procesado o consumo de agua, según corresponda), sin comprometer la estabilidad operacional.

Un APC híbrido combina las capacidades reactivas de un sistema experto con las capacidades predictivas de modelos de optimización ejecutados en línea. Adicionalmente, incorpora mecanismos de adaptación operacional que permiten reajustar las condiciones de evaluación en función de desviaciones detectadas o mediante la actualización periódica de información histórica, manteniendo su desempeño frente a cambios en el proceso.

La implementación de estas estrategias permite complementar la lógica difusa tradicional, ampliamente reconocida por su robustez en la protección de activos y la continuidad operacional, con técnicas avanzadas de optimización presentes en distintos niveles de APC, tales como RTO, Machine Learning y MPC. De esta manera, la capa de optimización basada en modelos potencia el desempeño del sistema existente sin reemplazar la estrategia de control basal.

La principal contribución de este enfoque es metodológica y aplicada: demuestra que es posible potenciar sistemas expertos instalados mediante modelos online de optimización, con bajo esfuerzo de implementación, alta confiabilidad operacional y beneficios observables en plazos reducidos. En este sentido, las estrategias de APC híbridas constituyen una vía práctica para capturar oportunidades de optimización difíciles de abordar solo mediante reglas heurísticas, manteniendo un equilibrio entre complejidad técnica, tiempo de desarrollo y retorno operacional.

Finalmente, la evolución desde sistemas expertos tradicionales hacia arquitecturas híbridas permite extender el alcance del APC industrial sin reemplazar la estrategia basal ni requerir inversiones significativas en nueva infraestructura. Esta aproximación aprovecha la instrumentación, comunicaciones y lógica de control ya disponibles, incorporando una capa dinámica de modelamiento y optimización que mejora la capacidad del sistema para operar cerca del óptimo real bajo condiciones variables de proceso.

6. Referencias

- Chrysosoulis, S., Stowe, K., & Reich, F. (1992). Characterization of composition of mineral surfaces by laser-probe microanalysis. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral processing and Extractive metallurgy*, C25-C32.
- Dawson, P., & Koorts, R. (2014). Flotation Control Incorporating Fuzzy Logic and Image Analysis. *IFAC Proceedings Volumes*.
- Guobin Zou, J. Z. (2023, junr 21). *Hierarchical Intelligent Control Method for Mineral Particle Size Based on Machine Learning*. Retrieved from MDPI: <https://www.mdpi.com/2075-163X/13/9/1143>
- Olivares, B. A., Navia, D., Quintanilla, P., & Araya, B. (2025). Saturation regulation in heap leaching: A nonlinear model predictive control approach. *Minerals Engineering*.
- Vazirizadeh, A., & Brooks, K. (2023). A Data-Driven Model for Grinding Circuit Control MPC. *Minerals Engineering*.