

Integración Digital Mina-Relaves: Sincronización Inteligente de la Cadena Mina-Planta-Relaves para Evitar Cuellos de Botella Operacionales

Autor: Edgar R. Quiroz, CEO Frame Limited, edgar.quiroz@frame.pe

Abstract

The mining industry faces increasing challenges related to declining ore grades, rising operational costs, high energy demands, and the critical need to ensure safety and sustainability, particularly in the management of tailings storage facilities (TSFs). This technical paper explores the potential of Mine-to-Tailings Digital Integration through the adoption of Digital Twin (DT) methodology and Industry 4.0 technologies, such as Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT), to achieve intelligent synchronisation across the entire value chain (Mine-Plant-Tailings). The aim is to mitigate operational variability and prevent bottlenecks caused by the lack of alignment between processes, from orebody characterisation to the final deposition of tailings. The conceptual frameworks of DT and the Mine-to-Mill (M2M) philosophy are reviewed, highlighting the importance of extending this approach to tailings management in order to optimise integrated processes and improve safety and resource efficiency, both of which are fundamental to sustainability.

Resumen

La industria minera enfrenta desafíos crecientes relacionados con la disminución de las leyes del mineral, el aumento de los costos operacionales, las altas demandas de energía, y la necesidad crítica de garantizar la seguridad y la sostenibilidad, especialmente en la gestión de depósitos de relaves (TSFs). Este artículo técnico explora el potencial de la **Integración Digital Mina-Relaves** mediante la adopción de la metodología de Gemelos Digitales (DT) y tecnologías de Industria 4.0, como la Inteligencia Artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT), para lograr una sincronización inteligente a lo largo de toda la cadena de valor (Mina-Planta-Relaves). El objetivo es mitigar la variabilidad operativa y prevenir los cuellos de botella causados por la desarticulación de los procesos, desde la caracterización del yacimiento hasta la disposición final de los relaves. Se revisan los marcos conceptuales de DT y la filosofía Mine-to-Mill (M2M), destacando la importancia de extender este enfoque a la gestión de relaves para optimizar procesos agregados y mejorar la seguridad y la eficiencia en el uso de recursos, lo cual es fundamental para la sostenibilidad.

1. Introducción

A lo largo de la historia, la humanidad ha buscado soluciones factibles para problemas complejos, lo que ha impulsado revoluciones industriales. La última de estas, la Industria 4.0,

está transformando la minería a través de tecnologías inteligentes como la IA, con el potencial de aumentar la rentabilidad, mejorar el desempeño, aumentar la seguridad y garantizar un mejor cumplimiento normativo ambiental.

En este contexto, el **Gemelo Digital (DT)** emerge como una herramienta poderosa, definida como una réplica virtual que utiliza aprendizaje automático (ML), datos históricos y en tiempo real, o modelos basados en la física, para simular, predecir y optimizar el rendimiento de un sistema del mundo real. Aunque la adopción de DT en el sector minero está rezagada respecto a otras áreas de ingeniería como la manufactura y la ingeniería civil, su potencial es innegable.

La optimización de la cadena de valor, tradicionalmente segmentada, se aborda mediante el enfoque **Mine-to-Mill (M2M)**, que busca la optimización holística considerando la característica del cuerpo mineral, el tronado, la conminución y el consumo de energía de toda la cadena. Sin embargo, a pesar de los avances en M2M, gran parte de la investigación se ha centrado en aspectos aislados del proceso. Existe una brecha significativa en la implementación de un sistema de DT que integre completamente la totalidad de la operación minera.

Este artículo propone un marco conceptual para la **Integración Digital Mina-Planta-Relaves**, extendiendo la lógica M2M para incluir la fase crítica de **gestión de relaves**. La correcta gestión de los relaves es fundamental, ya que son subproductos de la minería que representan riesgos sociales, ambientales y económicos, y las fallas de los TSFs han enfatizado la necesidad de una planificación estratégica y una integración total en la vida útil de la mina (LoM). La sincronización inteligente de datos en tiempo real entre la mina, la planta de procesamiento (flotación) y los TSFs es esencial para **evitar cuellos de botella operacionales** y asegurar la sostenibilidad.

2. Metodología

La implementación de la Integración Digital Mina-Planta-Relaves se basa en una arquitectura de Gemelo Digital que permite la simulación, el aprendizaje, la predicción y la optimización de los procesos a través de la **trazabilidad del material y la integración de datos**.

2.1. Arquitectura de Sincronización de Datos y Conectividad

Un Gemelo Digital efectivo requiere la integración de varias tecnologías, donde la recopilación de datos es fundamental.

1. **Sensores y Dispositivos IoT:** Los sensores y dispositivos IoT recopilan datos en tiempo real de los activos físicos a lo largo de toda la cadena. Esto incluye sensores en equipos (temperatura, presión, vibración, carga), sensores en la perforación para obtener datos geo-mecánicos (MWD), sistemas de visión artificial para análisis de fragmentación en

correas transportadoras, y una amplia variedad de sensores invasivos y no invasivos para el monitoreo de TSFs (piezómetros, celdas de presión, UAVs, satélites/InSAR, etc.).

2. **Sistemas de Comunicación:** Sistemas de comunicación efectivos son la columna vertebral de los Gemelos Digitales, permitiendo el flujo ininterrumpido de datos entre el activo físico y su réplica digital. Las conexiones inalámbricas (Wi-Fi, Bluetooth, redes celulares, Zigbee) son una tendencia clara en el monitoreo de TSFs y otras operaciones, superando en menciones a los sistemas cableados. La información se transmite a través de protocolos seguros y confiables (MQTT, HTTP).
3. **Análisis y Procesamiento (IA/ML/CC):** Los datos recopilados son agregados y procesados en el espacio virtual, a menudo en la nube (Cloud Computing, CC), y sometidos a técnicas innovadoras como IA, aprendizaje profundo (Deep Learning) y sistemas cognitivos. La IA es la tecnología más común relacionada con sensores de monitoreo de TSFs.

2.2. Trazabilidad del Material "Mine-to-Mill"

Para la sincronización inteligente de la cadena, se propone un enfoque orientado al material, utilizando **simulación de partículas distribuidas**.

- **Pseudo-partículas:** El material granular (mineral) se representa digitalmente como pseudo-partículas, donde cada una representa una gran colección de partículas reales.
- **Portadores de Datos:** Cada pseudo-partícula actúa como portadora de datos (identidad, posición, masa, concentración mineral, dureza, distribución de tamaño) y observaciones generadas por el equipo a medida que interactúa con el material real.
- **Seguimiento y Predicción:** La trazabilidad de estas pseudo-partículas permite conocer el material que está en almacenamiento (ej., en pilas o silos) y predecir su efecto en los procesos posteriores (downstream), como la molienda. Esto es vital para controlar y optimizar las propiedades del mineral alimentado al molino, como la distribución de tamaño y la dureza, que impactan fuertemente la eficiencia de la molienda.

2.3. Extensión de la Integración a Relaves (Mine-to-Tailings)

La integración se completa al incluir el destino final del material procesado: los relaves.

- **Planificación a Largo Plazo:** La gestión exitosa de TSFs se beneficia enormemente de la integración estratégica y la planificación a largo plazo dentro del plan de vida útil de la mina (LoM).
- **Monitoreo de TSFs:** Los sistemas DT y la tecnología de sensores (como piezómetros, inclinómetros, y sensores remotos) son cruciales para el monitoreo en tiempo real de la

salud estructural y la seguridad de los TSFs, lo cual es prioritario para la estabilidad geotécnica y la seguridad.

- **Diseño Sostenible:** La integración multidisciplinaria desde el diseño permite evaluar opciones de disposición, como los TSFs en el pit (in-pit TSFs), que tienden a presentar una menor consecuencia en caso de falla y pueden ser más económicos a largo plazo.

3. Casos de Éxito relacionados

La literatura documenta beneficios significativos de la integración de procesos, aunque la integración completa Mina-Planta-Relaves aún presenta una brecha.

3.1. Optimización Mine-to-Mill (M2M)

La optimización M2M ha demostrado mejoras sustanciales, principalmente al correlacionar la fragmentación de la voladura con la eficiencia de la conminución.

- **Mejora de la Eficiencia de Molienda:** La optimización del tronado para lograr una fragmentación más fina (el tamaño de partícula de -10 mm es un KPI clave) ha resultado en aumentos en el rendimiento de los molinos SAG que oscilan entre el 5% y el 30%.
- **Casos de Estudio de Plantas:** Se han documentado casos en los que la optimización M2M, que incluye la caracterización de la roca y ajustes en el diseño de la voladura, ha resultado en aumentos de rendimiento del molino SAG de aproximadamente el 30% (ejemplo de Antamina). En otros casos, como el de Minera Chinalco, se identificaron oportunidades para aumentar el rendimiento del molino SAG hasta en un 14% mediante la mejora de la fragmentación de la voladura y el aumento de la carga de bolas.
- **Trazabilidad y Dureza:** La capacidad de identificar la relación entre la dureza del mineral y el rendimiento del molino (backtracking) es posible gracias a la representación basada en partículas.

3.2. Integración de la Planificación de Relaves

La integración de la gestión de relaves con la planificación minera, aunque no siempre mediada por DT en los ejemplos publicados, ha demostrado beneficios de reducción de riesgo y costos a largo plazo.

- **Rio Tinto Iron Ore (RTIO):** En las operaciones de RTIO, se lograron beneficios significativos mediante la integración de la planificación de relaves a largo plazo en el plan minero. Esto fue posible gracias a un plan de gestión de relaves actualizado anualmente con la participación de un equipo multidisciplinario.

- **Disposición In-Pit:** En el Sitio A y Sitio B de RTIO, la colaboración temprana resultó en el desarrollo de instalaciones de TSFs en el pit (in-pit TSFs), que presentaron un riesgo de consecuencias menor en caso de falla y fueron más económicas a largo plazo que las instalaciones ex-pit (fuera del tajo). Un ejemplo en el Sitio B mostró que la colaboración resultó en una reducción de riesgos en las operaciones y el cierre, con un costo significativamente menor.

4. Discusión y Resultados

La sincronización inteligente de la cadena Mina-Planta-Relaves, posibilitada por los DT, aborda las ineficiencias causadas por la variabilidad del mineral y la desintegración de los procesos.

4.1. Mitigación de Cuellos de Botella y Variabilidad

La principal ventaja del enfoque de integración digital es la capacidad de convertir datos en información práctica en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones más rápida y precisa.

- **Gestión del Flujo de Mineral:** El seguimiento de pseudo-partículas permite predecir cuándo el mineral con ciertas características (ej. alta dureza) alcanzará la planta, permitiendo ajustes preventivos en el control del proceso o estrategias de mezcla (blending) para mantener un *feed* constante y óptimo, evitando sobrecargas de equipos como correas o trituradoras (cuellos de botella). Esto optimiza la eficiencia del circuito de conminución, el proceso más intensivo en energía de la minería.
- **Optimización de Procesos Específicos:** Los DT permiten simular y optimizar procesos individuales antes de su implementación en la vida real. Por ejemplo, en el circuito de trituración, un DT basado en simulación dinámica puede ofrecer un conjunto completo de variables operacionales para la optimización del sistema de control. En la gestión de flotas, los DT ofrecen modelos virtuales para optimizar rutas y predecir el mantenimiento, reduciendo el tiempo de inactividad.

4.2. Resultados en Sostenibilidad y Seguridad

La integración digital extiende los beneficios de optimización a la seguridad y la sostenibilidad, elementos cruciales para el futuro de la minería.

- **Monitoreo Proactivo de TSFs:** Los sistemas de monitoreo en tiempo real, impulsados por tecnologías Industry 4.0, son esenciales para la seguridad de los TSFs. La capacidad de recopilar y analizar grandes volúmenes de datos de sensores permite la detección temprana de peligros, como la deformación del suelo o la variación de la presión del agua (piezómetros) en la presa, reduciendo el riesgo de fallas catastróficas.

- **Gestión de Recursos:** La tecnología DT puede contribuir a los objetivos de sostenibilidad al optimizar el uso de recursos y reducir el desperdicio. En el manejo de relaves, las tecnologías de desaguado (relaves espesados o filtrados) son inherentemente más estables que los métodos convencionales, pero exigen una gestión energética eficiente, un área donde los Gemelos Digitales pueden ayudar a predecir y optimizar los flujos de energía y agua. La implementación de tecnologías de desaguado (como las plantas de espesamiento o filtración de Metso Outotec) busca la recuperación eficiente de agua y la reducción del riesgo.

4.3. Limitaciones y Brechas

A pesar del potencial, la implementación de DT y la integración total enfrenta desafíos significativos.

- **Fragmentación de Estudios:** La mayoría de los estudios se centran en aspectos aislados (ej. monitoreo de equipos o procesamiento mineral), faltando la integración total que abarque desde la mina hasta los relaves. La integración masiva de sensores con tecnologías Industry 4.0, como los Gemelos Digitales completos (DT), aún es escasa en estudios de caso sobre TSFs.
- **Desafíos Técnicos y Culturales:** La integración de DT con sistemas heredados y la gestión de grandes volúmenes de datos (Big Data) en tiempo real son desafíos técnicos importantes. Culturalmente, la minería ha sido tradicionalmente cautelosa, lo que, junto con la brecha de habilidades digitales, ralentiza la adopción.

5. Conclusiones

La Integración Digital Mina-Planta-Relaves, impulsada por los Gemelos Digitales, la IA y el IoT, representa el camino crucial para la minería inteligente del futuro. Esta integración permite la **sincronización inteligente y en tiempo real** de la cadena de valor completa, desde la caracterización del mineral hasta la disposición final de los relaves, ofreciendo la capacidad de predecir, simular y optimizar las operaciones.

Al adoptar la trazabilidad basada en partículas y utilizar modelos predictivos avanzados, las compañías pueden **evitar cuellos de botella operativos** derivados de la variabilidad del mineral (dureza, fragmentación) y lograr una optimización holística M2M que maximiza la rentabilidad y minimiza el consumo de energía en la conminución.

Además, la extensión de este enfoque a la gestión de relaves es imperativa para la seguridad y la sostenibilidad, permitiendo el monitoreo proactivo de TSFs y apoyando soluciones de disposición de menor riesgo, como los relaves espesados/filtrados y las instalaciones *in-pit*. Para aprovechar plenamente este potencial, es necesario cerrar las brechas de integración,

estandarización de datos y desarrollo de infraestructura digital robusta, especialmente en entornos remotos.

6. Bibliografía

- Nobahara, P., Xu, C., Dowd, P., & Shirani Faradonbeh, R. (2024).
- Exploring digital twin systems in mining operations: A review. *Green and Smart Mining Engineering*. Nobahara, P., et al. (2024).
- *Green and Smart Mining Engineering*. Nobahara, P., et al. (2024).
- *Green and Smart Mining Engineering*. Emerson. (2019).
- Applying the digital twin to crushing circuits. Coffey, J. P., Plunkett, J. D., & Carneiro, A. (2021).
- The benefits of integrating long-term tailings and mine plans. *Paste 2021*.
- Coffey, J. P., et al. (2021).
- *Paste 2021*. Servin, M., Vesterlund, F., & Wallin, E. (2021).
- Digital twins with distributed particle simulation for mine-to-mill material tracking. Servin, M., et al. (2021).
- Ghahramanieisalou, M., & Sattarvand, J. (2024).
- Digital Twins and the Mining Industry. Ghahramanieisalou, M., & Sattarvand, J. (2024).
- Digital Twins and the Mining Industry. Guo, L., Funari, V., & Li, M. (2023).
- Editorial: Advances in sustainable mine tailings management. *Front. Earth Sci.* Araya, N., Mamani Quiñonez, O., Cisternas, L. A., & Kraslawski, A. (2021).
- Sustainable Development Goals in Mine Tailings Management: Targets and Indicators. *Mater. Proc.* Cacciuttolo, C., Guzmán, V., Catriñir, P., & Atencio, E. (2024).
- Sensor Technologies for Safety Monitoring in Mine Tailings Storage Facilities: Solutions in the Industry 4.0 Era. *Minerals*. Cacciuttolo, C., et al. (2024).
- Applications of Kuz–Ram Models in Mine-to-Mill Integration and Optimization—A Review. *Minerals*. Saldana, M., et al. (2024).