

MINERÍA SOSTENIBLE:

Procesos de planta requieren de cambios tecnológicos mayores

La minería necesita contar con nuevas tecnologías de procesamiento y de predicción. La caída en la calidad de los materiales explotados y la mayor cantidad de impurezas que contienen constituyen nuevos desafíos.

Una de las grandes tareas de la minería sostenible es avanzar en el procesamiento de minerales y en la descarbonización de la matriz energética que alimenta a la mina. "Las etapas plantan pueden consumir hasta el 60% de la energía y agua de la mina, lo que incluso aumentará en las próximas décadas, según lo proyectado por Cochilco. Además, considera el uso de bolas en molineras SAG-bolas, lo cual es también un insumo y gasto relevante. Esta etapa además concentra los principales costos de capital y operacionales de la mina", explica Pia Lois Morales, profesora asistente del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile.

Si bien durante las últimas décadas la tecnología empleada en las plantas ha tenido una mejora incremental, no es suficiente, y se requieren cambios tecnológicos mayores. "Operar de manera estable las plantas actuales no es suficiente para el escenario que se avizora, donde reducir consumos de agua y energía es imperioso. Actualmente, existen límites operacionales en las tecnologías tradicionales, tales como un porcentaje de sólidos de 40% en la flotación, el uso de bolas, etc., la molienda fina que genera gran volumen de relaves, por lo que es necesario contar con nuevas tecnologías de procesamiento y de predicción", precisa.

En este contexto, la reducción de leyes y la variabilidad *in situ*



Molino para molar rocas de mineral, reducir su tamaño y hacerlo apto para etapas siguientes de procesamiento.

de los yacimientos son grandes desafíos, ya que implican tratar más material para obtener la misma tonelada de cobre fino. "Trabajar con materiales complejos requiere mejorar la capacidad de predicción para operar eficientemente y bajar la incertidumbre, pero para esto también se requiere mejor comprensión de la interacción

del material con su ruta de procesamiento". "Trabajar con materiales complejos requiere mejorar la capacidad de predicción para operar eficientemente y bajar la incertidumbre, pero para esto también se requiere mejor comprensión de la interacción



Pia Lois, profesora asistente del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile.

principal es que generalmente se desconoce cómo se comportará un material distinto al tratado anteriormente, tanto en una planta convencional como en una tecnología nueva", agrega.

Por su parte, el nivel de impurezas también hace que los procesos productivos sean más caros y menos predecibles. "Aún hace falta entender mejor cómo afecta la geología del material sobre el procesamiento mineral, sobre todo en el contexto de que hay muchas tecnologías nuevas de caracterización de las propiedades geológicas. Falta conectar la información con la planta", comenta.

TECNOLOGÍAS

Se estima que el 75% de las plantas de procesamiento de minerales aún utiliza estrategias básicas de optimización, aunque se ha habido cambios y hoy se vislumbran mejores oportunidades. Por ejemplo, hace varias décadas que la tecnología *high-pressure grinding rolls* (HPGR) está en el tercio; sin embargo, su *takeover* ha sido bastante lento. Esta tecnología puede reducir el consumo energético de molienda y también algunos estudios muestran que incrementa el microfracturamiento, disminuyendo la dureza metalúrgica del material en etapas posteriores. "Los circuitos HPGR-Bolas vislumbran ser el menos del 20% más eficientes en el consumo

energético y generar una disminución de los insumos de bolas. Vale la pena también mirar otras tecnologías de optimización (reducción del tamaño de los materiales para su posterior procesamiento) como la molienda vertical en una etapa que también promete una optimización más rápida y eficiente", dice Pia Lois.

Por otra parte, la disminución de leyes requiere que se procese más material para obtener la misma unidad de cobre fino. Tecnologías de *ore sorting* y pre-concentración han mostrado ser una opción para la reducción de masa.

Las tecnologías de flotación gruesa mediante capa fluidizada (CFF) han mostrado una separación de partículas más gruesas (> 300 micras), lo cual no es realizable por la típica flotación convencional. "Esto también permite un descarte de material en etapas tempranas, y reducción de energía de optimización y agua en las etapas de concentración, además de la reducción del volumen de relaves. Todas las tecnologías nuevas, y la eficiencia que puedan tener, también dependen de las características del material y su comportamiento geoalérgico, por lo que es necesario este desarrollo".

Con todo, el uso de estas tecnologías, más el análisis de la información *comachine learning* e inteligencia artificial, da pie a que se generen mejores predicciones.

INVESTIGACIÓN UNIVERSITARIA

El Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile está desarrollando un interesante trabajo de investigación en fragmentación y molienda. Al respecto, Pia Lois sostiene que la investigación realizada en esta área aporta con una mirada académica de los desafíos. "Desde el punto

de vista de las tecnologías, la universidad apoya la conceptualización y verificación de principios fundamentales de cómo funcionan las nuevas tecnologías para determinar el real aporte que podrían hacer".

Esto se realiza a partir de alianzas

estratégicas con las empresas proveedoras y las mineras, y con otros centros de investigación en otras partes del mundo, ya que los problemas mencionados son de magnitud mundial.

"Por su parte —añade—, la universidad también tiene sus propios desarrollos

tecnológicos, principalmente en el área de la caracterización y en el área del análisis de datos e integración de estos, y cuenta con instalaciones para realizar estudios de caracterización para procesamiento de minerales que aportan al entendimiento de la eficiencia de las plantas de tratamiento".



JAIME E. SEPÚLVEDA, socio de Instituto de Ingenieros de Chile (IIMCh) y director ejecutivo de J-Consultors Ltda.

En líneas generales, el procesamiento de minerales abarca las múltiples etapas de la cadena productiva requeridas para la "liberación" y posterior "concentración" de las especies valiosas de alto valor contenidas en el mineral. Por "liberación" se entiende el proceso de fragmentación o molienda de las rocas a algunas partículas suficientemente pequeñas de alto contenido de especies valiosas (100% liberadas) y el resto de los fragmentos, solo materiales de desecho o ganga. La etapa posterior de "concentración" consiste en la recuperación selectiva de las partículas mineralizadas en la forma de concentrados de la mayor pureza posible.

Las distintas etapas de molienda contribuyen significativamente al consumo de energía del proceso extractivo global. Técnicamente se reconoce que la demanda de energía (kWh) requerida para lograr un debido grado de

PROCESAMIENTO DE MINERALES:

Una industria de lenta evolución tecnológica

La industria minera se ha caracterizado por su altísima aversión al riesgo, lo cual es entendible, considerando los altos costos asociados a los potenciales fracasos de iniciativas innovadoras.



En la minería, las bolas de acero son utilizadas durante el proceso de molienda de la roca extraída, comúnmente dentro de molinos.

fragmentación de un determinado flujo de mineral (toneladas/hora) es directamente proporcional al consumo específico de energía, definido como los kWh de energía consumidos por cada tonelada de mineral molido. Por ello, el foco de toda operación consiste en la reducción de su consumo específico de energía, como indicador de la eficiencia del proceso.

La cantidad de energía consumida en estas faenas

puede llegar a valores de considerable magnitud relativa. De ahí la imperiosa necesidad de llevar adelante todas aquellas iniciativas de innovación que representen una potencial reducción de los consumos de energía en el procesamiento de minerales.

En el procesamiento de minerales, los esfuerzos de innovación se pueden clasificar en dos grandes áreas: optimización operacional e

innovación tecnológica.

OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL

La experiencia acumulada ha permitido reducir sistemáticamente los consumos de energía específica, logrando incrementar el tonelaje procesado por cada kilovatio (kW) de potencia instalada. Sumado a ello, la continua ampliación de las instalaciones existentes ha permitido incrementar

gradualmente los tonelajes procesados. Sin duda, el "gigantismo" ha estado siempre presente en tales ampliaciones.

En el caso de la molienda de minerales, el aprendizaje empírico de los operadores y analistas ha permitido establecer pautas específicas para la optimización de estos procesos, tales como, asegurar la máxima demanda de potencia de los equipos existentes, revisar la denominada "tasa de molienda" (relación del producto más grueso compatible con las etapas subsiguientes del proceso) y maximizar la disponibilidad y uso (reciclaje) del material de molienda.

En forma paralela, la industria de proveedores de insumos esenciales para la minería mantiene continuos esfuerzos en el desarrollo de nuevos y mejores productos. Prácticamente se ha resuelto el problema del fracturamiento de las bolas de molienda, especialmente en molinos SAG. A su vez, destaca el desarrollo de revestimientos, de mayor duración, como los diseños "híbridos" que combinan acero y goma.

viabilidad no haya sido antes demostrada. Una propuesta de nueva tecnología debe superar etapas sucesionales de ensayos de laboratorio y pilotos, antes de alcanzar su aplicación industrial. Este largo proceso de desarrollo puede tomar varias décadas.

Por tal razón, las operaciones de procesamiento de minerales no han experimentado grandes transformaciones, luego de la plena adopción de la molienda SAG y el siglo pasado, la introducción de los HPGR en el presente siglo.

No se vislumbran otros desarrollos tecnológicos que puedan cambiar el actual status-quo de la industria. Se sigue experimentando con aplicaciones de microondas o descargas eléctricas de alto voltaje tendientes a "pre-ablandar" el mineral de alimentación.

Donde sí se ha observado avances es el último tiempo es en el desarrollo de sensores en líneas que abren nuevas oportunidades para el control automático de las operaciones. Destacan el procesamiento de imágenes para determinar la distribución de tamaños de las rocas alimentadas a los molinos SAG y el desarrollo de sensores (acelerómetros) para monitorear la posición de la carga interna del molino. Resaltan, también, nuevos sistemas de medición del tamaño característico del producto molido alimentado a la etapa siguiente del proceso.

INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

La industria minera se ha caracterizado por su altísima aversión al riesgo, lo cual es entendible, considerando los altos costos asociados a los potenciales fracasos de iniciativas innovadoras, cuya