

# Molienda más gruesa: Beneficios económicos y tecnologías habilitadoras

Robert Maron<sup>1\*</sup>, Jaime Sepulveda<sup>2</sup>, Adam Jordens<sup>1</sup>, Christian O'Keefe<sup>1</sup>, Henry Walqui<sup>1</sup>

1. *CiDRA Minerals Processing, USA*
2. *J-Consultants, Ltd.*

## RESUMEN

Una molienda más gruesa y la recuperación de partículas de mayor tamaño reciben cada vez mayor atención como estrategia potencial para superar los múltiples desafíos que enfrenta la industria minera hoy en día y en el futuro previsible. Los minerales de baja ley, generalmente más duros, exigen el procesamiento de grandes cantidades de material para alcanzar al menos la misma tasa de producción, lo que necesariamente resulta en un aumento de costos.

Según lo dictan las bien conocidas Leyes de Cominución, el aumento del tamaño final resultante de la molienda eleva considerablemente el tonelajetonelaje y reduce el consumo específico de energía y los costos de producción. Sin embargo, la implementación de esta estrategia de molienda con partículas de mayor tamaño se podría ver obstaculizada por dos limitaciones claves.

La primera limitación consiste en controlar adecuadamente el tamaño del producto final para poder acercarse lo más posible y de una forma segura a los límites del proceso. Para lo anterior es necesario contar con un sistema de control de proceso avanzado que pueda alcanzar la granulometría deseada, pero con una baja variabilidad de tamaño. Una limitación clave en el logro de dicho objetivo ha sido la falta de una metodología para medir el tamaño de partícula que, además de confiable, esté disponible en línea y en tiempo real. CiDRA ha desarrollado una nueva tecnología para la medición que permite superar esto, con lo cual el circuito de molienda queda mejor dispuesto para implementar una estrategia de molienda más gruesa.

La segunda limitación es la caída potencial en recuperación de metal en el circuito de flotación convencional debido a su limitada capacidad para recuperar partículas de mayor tamaño. Aunque las investigaciones han demostrado que dicha pérdida en recuperación se ve más que compensada por un aumento en el tonelaje, tradicionalmente las operaciones se han resistido a aceptar pérdidas de recuperación. Al respecto, CiDRA se encuentra en las últimas etapas de desarrollo de una tecnología de separación radicalmente innovadora “sin burbujas”, y por ende, muy distinta a la flotación convencional, que tiene la capacidad de recuperar partículas en toda la gama de distribución granulométrica generada por un circuito de molienda que opera en una modalidad de “molienda gruesa”.

El presente trabajo aborda primordialmente la primera de estas limitaciones. Se presenta una metodología para estimar los beneficios de una molienda más gruesa, utilizando un control avanzado de proceso gracias a una medición confiable y en línea del tamaño de partícula. A continuación se presentan estudios de caso y estrategias de control de alto nivel.

**\*Autor correspondiente:** CiDRA Mineral Processing Inc., Director Latinoamerica, 50 Barnes Park North, Wallingford, CT 06492. Teléfono: +1 860 638 9928. Email: rmaron@cidra.com.

## INTRODUCCIÓN

Desde hace mucho la industria minera ha sabido que una molienda más gruesa podría aportar beneficios significativos debido al aumento en productividad (Giblet et.al. 2016, Burger et.al. 2011), pero no ha logrado sacar el máximo provecho de este beneficio principalmente debido a la limitación de la flotación con espuma para recuperar partículas gruesas. Existen tecnologías recientes de separación para recuperar partículas gruesas que han comenzado a abordar esta limitación, lo que ha llevado a las principales empresas mineras a evaluar seriamente los beneficios de las estrategias de molienda gruesa que se estima pueden generar hasta un 15% de ganancias en flujo de caja con menor gasto de capital, menor riesgo y menor tiempo de implementación en comparación con proyectos nuevos o greenfield.

Para obtener los beneficios absolutos de una estrategia de molienda más gruesa se deben superar dos desafíos: una molienda más gruesa y recuperar las partículas más gruesas. Al abordar el primer desafío se pueden obtener rápidamente algunos de los beneficios potenciales, por lo general de 2% a 6%, y a un costo relativamente bajo. Al implementar una mejor medición y control del tamaño final del producto molido es posible reducir su variabilidad, lo que permite aumentar el tamaño hasta el límite de las tecnologías de proceso existentes, lo que implica elevar la eficacia de los molinos de bolas que operan en circuito cerrado con los hidrociclones de clasificación.

Luego se puede implementar una tecnología de recuperación de partículas más gruesas y es posible aumentar el tamaño de molienda más allá de los límites operacionales de la tecnología convencional de flotación. En este caso es posible recuperar las pérdidas generadas por la tecnología convencional de flotación principalmente en las fracciones de tamaño más gruesas, con lo cual es factible maximizar el tonelaje, sacrificando un mínimo de recuperación en planta. Actualmente CiDRA se encuentra desarrollando una plataforma tecnológica para recuperar partículas gruesas que aborda esta aplicación.

La capacidad de implementar una estrategia de molienda más gruesa en el corto plazo, que es el foco del presente trabajo, implica el uso de una novedosa tecnología acústica de medición de tamaño de partícula que se basa en el impacto. Dicha tecnología de medición ha sido desarrollada por CiDRA Minerals Processing bajo el nombre comercial de CYCLONEtrac Particle Size Tracking (PST). Se encuentra en uso en operaciones industriales en todo el mundo, generando aumentos tanto en tonelaje como en recuperación, casi con un 100% de disponibilidad y un requerimiento mínimo de mantención. Supera las limitaciones de las tecnologías 'near-line' más antiguas, a menudo debido a problemas con el muestreo de pulpa y los sistemas de transporte necesarios para hacer llegar las muestras a los instrumentos de medición ubicados en forma remota respecto del flujo de proceso. Incorporar esta medición confiable y en tiempo real del tamaño de partícula a una estrategia de control les permite a los operadores aumentar el tamaño del producto y acercarse con mayor confianza a los límites de los procesos aguas abajo.

## METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LOS BENEFICIOS DE UNA MOLIENDA MÁS GRUESA

El primer paso para evaluar una estrategia potencial de molienda más gruesa en una operación existente es evaluar los beneficios potenciales. En general son tres los métodos que se han utilizado: cambiar el tamaño de molienda en una planta de escala industrial y observar los efectos, utilizar programas de simulación tanto para la molienda como para la flotación y los ensayos de laboratorio con muestras de circuitos industriales. Los tres métodos son útiles, sin embargo implican tiempo y gastos considerables. Los autores han desarrollado una metodología simple con ayuda de datos de planta históricos en un período prolongado de tiempo para evaluar el rendimiento actual y predecir la mejora que sería posible al aumentar exitosamente el tamaño de la molienda (Maron et.al. 2017, 2018).

Esta metodología utiliza los datos diarios de la concentradora durante un período lo suficientemente extenso (idealmente más de un año o incluso más) para obtener una evaluación de alto nivel del rendimiento operacional de la planta, enfocándose principalmente en tonelaje (T), y recuperación (R), los cuales se utilizan para calcular la producción neta de metal (NMP) – el generador primario de flujo de caja – lo que entrega la función objetiva final para propósitos de optimización de proceso, según lo determina la siguiente expresión simple:

$$NMP = h T R$$

**Ecuación 1** Función objetiva para calcular la Producción Neta de Metal (NMP)

Donde h representa la ley de cabeza del metal valioso que se recupera.

Algo inherente a esta metodología es la observación típica de que el tonelaje (T) y la recuperación (R) dependen en gran medida del tamaño del producto, por ende el tamaño del producto se elige como la variable independiente. En consecuencia, la producción neta de metal (NMP) también debe depender considerablemente del tamaño del producto, de modo que debe existir un tamaño óptimo de producto que maximice NMP y el flujo de caja.

El set de datos no filtrados típico que se muestra en la Figura 1 a la izquierda revela una nube de datos de ponderación centralizada que hace que la detección de tendencia sea poco confiable, de modo que se recurre a una técnica de discretización de datos, que arroja el set de datos filtrados que se muestran en la Figura 1 a la derecha. Este set de datos muestra que es posible obtener un aumento de NMP de ~2,5% al aumentar el tamaño de partícula del producto final. En una sección posterior se analizan otros beneficios potenciales que se deben a un control mejorado del proceso y a una menor variabilidad de tamaño.

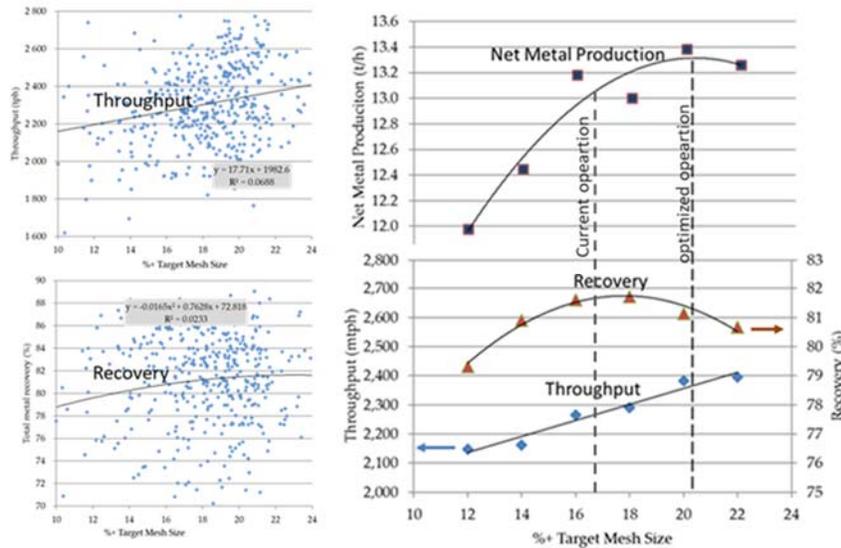


Figura 1 Tonelaje & Recuperación sin filtrar (izq.), con discretización de datos (der.) con función objetivo de Producción Neta de Metal (NMP) según Ecuación 1

### MOLIENDA MÁS GRUESA: MEDICIÓN, CONTROL, OPTIMIZACIÓN

Seleccionar una estrategia de molienda gruesa involucra la determinación de las condiciones impuestas por los operadores que maximicen el tonelaje de la línea de molienda en un tamaño de producto final más grande, y a la vez acercarse lo más posible y con seguridad a los límites del proceso aguas abajo. En el caso de una línea de molienda consistente en un molino SAG seguido por molinos de bolas convencionales, dicha estrategia de optimización implica maximizar el tonelaje de alimentación fresca al molino SAG y, al mismo tiempo, respetar la capacidad y las limitaciones del molino de bolas y el circuito de clasificación aguas abajo para producir el tamaño de producto final más grueso deseado.

### Molienda secundaria: Optimización de molino de bolas y circuito de clasificación

En la molienda de bolas convencional, las así denominadas Leyes de Cominución y en particular la ley de Bond hacen énfasis en la importancia del consumo específico de energía como la condición operacional más determinante que impacta el tamaño del producto resultante en un sistema de molienda/clasificación. Como lo indica la Ecuación 2 se muestra que el tonelaje (T) se relaciona fundamentalmente con la razón de potencia (P) consumida en la molienda respecto del consumo específico de energía (E). Además, cuando se vuelve a plantear la Ley de Bond a continuación, ésta muestra que se puede maximizar el tonelaje (T) relajando la Tarea de Molienda ( $F_{80}$ ,  $P_{80}$ ), maximizando el consumo de Potencia del molino (P), y reduciendo el Índice de Molienda Operacional ( $W_{i0}$ ).

De esta forma queda claro que existen tres vías disponibles para aumentar el tonelaje.

Primero, se debería maximizar el consumo de potencia del molino ajustando su velocidad y nivel de carga cuando sea posible. Segundo, se debería reducir (relajar) la tarea de molienda, lo cual se consigue de forma más eficaz al aumentar el P80, que es nuestro principal objetivo. Tercero, se debería incrementar la eficacia de la clasificación, lo cual es una medida de la eficacia con la que se está direccionando la energía del molino para moler las partículas gruesas que aún no se han reducido a su tamaño objetivo.

$$T = \frac{P}{E} = \frac{\text{Classification "Effectiveness" Input}}{\text{Grinding Task}}$$

$$T = \frac{P}{E} = \frac{(1/W_{i0}) \cdot P}{10 (1/P_{80}^{0.5} - 1/F_{80}^{0.5})}$$

**Ecuación 2** La Ley de Bond muestra oportunidades de maximizar el tonelaje (T)

Se destaca que la eficacia de la clasificación está determinada por  $W_{i0}$  el cual aparece como un término recíproco en la Ecuación 2, y representa de qué forma contribuyen los hidrociclones de clasificación a reducir las toneladas procesadas por unidad de energía consumida. Esto implica que para alcanzar una eficiencia óptima de energía y un mayor tonelaje se debe lograr minimizar el contenido de partículas finas en la carga del molino para una tarea de molienda determinada. Esto es posible si se opera el circuito de acuerdo a las tres condiciones siguientes, que en ocasiones se denominan como el criterio de "Cuarta Ley" y que se resumen de forma gráfica en la Figura 2.

- Overflow con un mínimo de % de sólidos, sólo limitado por la disponibilidad total de agua,
- Underflow con un máximo de % de sólidos, sólo limitado por la tan adversa condición de acordonamiento en los hidrociclones,
- Máxima carga circulante, sólo limitada por la capacidad de la(s) bomba(s) y el molino mismo para transportar el volumen necesario de pulpa.

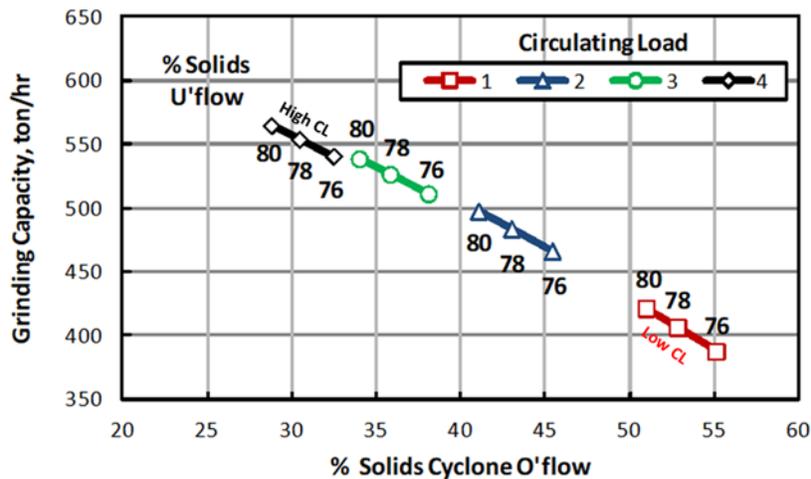


Figura 2 Simulaciones exploratorias del criterio "4ª Ley" de Cominuación; P80 constante, número y geometría de hidrociclones ajustados para mantener constante la pérdida de presión

### Molienda primaria:

En el caso del molino SAG la optimización involucra encontrar las condiciones operacionales que maximicen el tonelaje fresco de alimentación para satisfacer la demanda del molino de bolas. A los sistemas SAG también les son aplicables las mismas consideraciones teóricas utilizadas para los sistemas de molienda de bolas, siempre que se reconozca que para la molienda SAG existen dos tipos de medios de molienda: bolas y rocas. Cada una de los cuales actúa de manera independiente con su propia eficacia. Recientemente se ha explorado en detalle la optimización de la molienda SAG, demostrando que la optimización de las condiciones impuestas por el operador a la Celda de Carga (% de llenado de carga), presión en los descansos, velocidad y densidad de descarga del molino (% de sólidos) puede generar mejoras significativas de tonelaje superiores al 13% en un caso (Sepúlveda et.al 2018). En los casos en que se utiliza la tecnología HPGR más reciente (rodillos de molienda de alta presión) en lugar de molinos SAG, es mucho más fácil moler más grueso y ganar tonelaje puesto que basta con aumentar la apertura del harnero que controla el tamaño del producto.

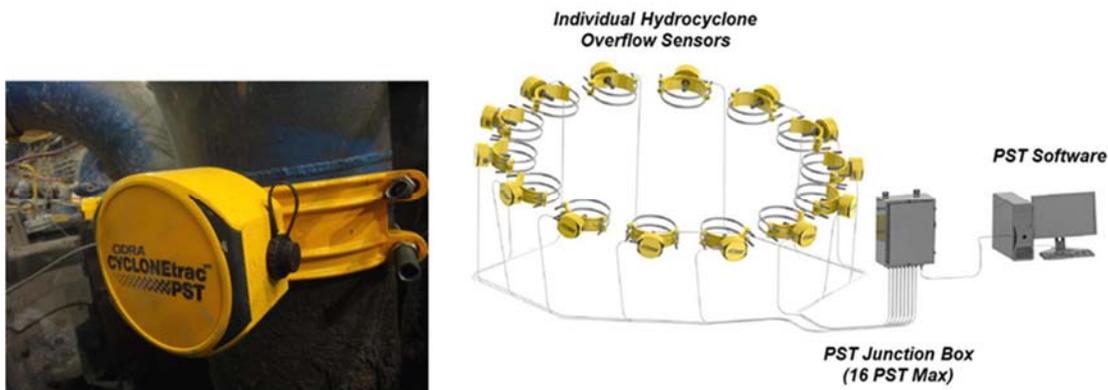
### Molienda más gruesa: Cómo controlar el circuito de molienda

Es bien sabido que la medición es esencial para lograr un control eficaz. La medición confiable y en tiempo real del tamaño del producto final de la molienda ha sido un desafío históricamente importante debido a las limitaciones de las tecnologías más antiguas, sin embargo hoy en día se ha podido superar mediante una tecnología diseñada específicamente para esta aplicación tan exigente e importante.

### Medición de impacto en tiempo real y basada en el impacto en flujos individuales de overflow de ciclones

El seguimiento acústico del tamaño de partícula basado en impacto es un método exclusivo para medir y controlar el tamaño de malla de referencia del producto en los flujos de overflow de los

ciclones. La implementación de esta tecnología se centra en una sonda sensor que se inserta en el flujo de pulpa del overflow por medio de una perforación de dos pulgadas (50 mm) en el ducto de overflow. Las partículas en el flujo de pulpa hacen impacto con la superficie de la sonda lo que genera ondas de esfuerzo en el desplazamiento dentro de la sonda. Un sensor se encarga de convertir estas ondas de esfuerzo a una señal eléctrica y algunas técnicas de desarrollo interno para procesar dichas señales convierten estas señales en una medición de tamaño de partícula que se genera cada cuatro segundos. El sensor está en contacto permanentemente con muchísimas partículas en el flujo de pulpa, por ende, obtiene información sobre una cantidad de partículas que es órdenes de magnitud superior a las tecnologías tradicionales en base a muestreo. Asimismo, debido a la ubicación del sensor aguas abajo del hidrociclón y a la presencia de un núcleo de aire en ese punto, el sensor no genera cambios en la contrapresión que detecta el hidrociclón y, en consecuencia, no afecta el rendimiento del hidrociclón. La sonda tiene una vida útil de 18 meses aproximadamente debido al desgaste abrasivo provocado por el impacto directo de la pulpa. La vida útil de la sonda se relaciona con la dureza y el tamaño de las partículas, el cual es obviamente más fino en el flujo de overflow comparado con el flujo de alimentación, haciendo posible una vida útil aceptable de la sonda. En la actualidad el software entrega hasta cinco tamaños de malla de referencia para incorporar a una estrategia de control de proceso. La Figura 3 muestra los principales componentes del sistema PST.



**Figura 3** Cabezal sensor PST montado (izq.), y sistema con interconexiones (der.)

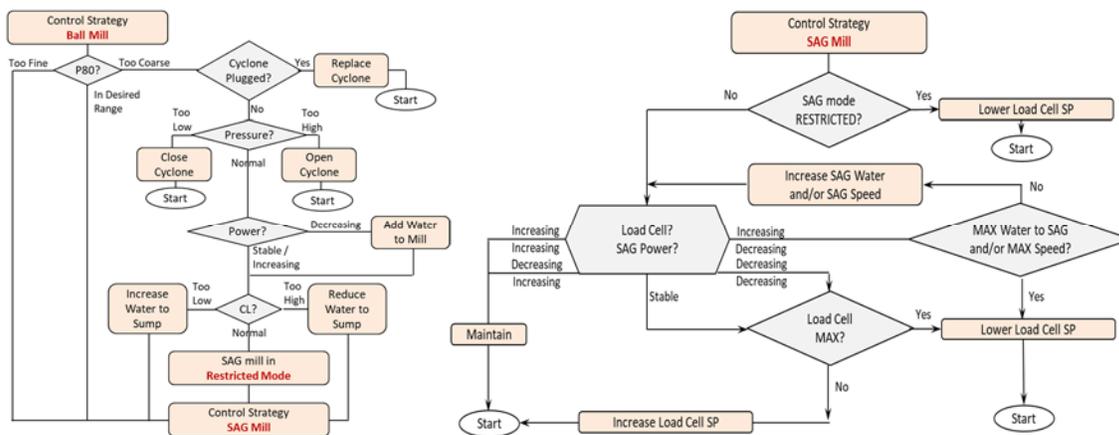
### **Filosofía de control de molienda más gruesa mediante medición de tamaño de partícula en tiempo real con PST**

El sistema PST hace posibles dos niveles de estrategia de control.

La primera estrategia se basa en el uso de una sola medición de tamaño para toda la batería según un compuesto de las señales individuales del sistema PST. Con frecuencia se utiliza la señal mediana debido su menor sensibilidad a valores muy bajos o muy altos, comparada con la señal media, con lo cual se mejora la estabilidad del control. Este tamaño compuesto único se usa posteriormente de la forma usual para programar el circuito de modo que produzca un tamaño más grueso o más fino, si es que no está ya dentro del rango deseado.

La segunda estrategia es una novedad gracias al PST, el cual monitorea la señal de cada uno de los ciclones e identifica aquellos que están clasificando fuera del rango deseado (demasiado grueso o demasiado fino) y permite corregir dicha condición cerrando el ciclón que está fuera de rango y abriendo otro. Esta estrategia tiene una importancia significativa dado que cuando el circuito de control le ordena al circuito moler más grueso, los ciclones se pueden desviar de su rango operacional normal y entrar en una condición de pre-acordonamiento o acordonamiento. El PST permite detectar de forma inmediata el aumento de tamaño excesivo de las partículas, lo que permite adoptar acciones correctivas como cerrar el hidrociclón.

El valor P80 (o un tamaño de malla de referencia) lo entrega el sistema PST. La velocidad de la bomba permite controlar el nivel del sumidero. Cuando el P80 compuesto de todos los ciclones en una batería es demasiado fino y el molino de bolas no tiene la capacidad para elevarlo hasta el tamaño objetivo más grueso deseado, entonces el sistema libera al molino SAG elevando el set point de la celda de carga, lo cual aumenta el tonelaje. Cuando el P80 compuesto de todos los ciclones es demasiado grueso y el molino de bolas no puede reducirlo al rango deseado, entonces el sistema deja al molino SAG en un modo de restricción bajando el set point de la celda de carga, lo cual reduce el tonelaje. La segunda estrategia antes descrita está monitoreando constantemente cada uno de los ciclones de modo que si la señal del PST de alguno en particular indica que el tamaño del overflow es demasiado grueso, entonces dicho ciclón se cierra y lo reemplaza otro.

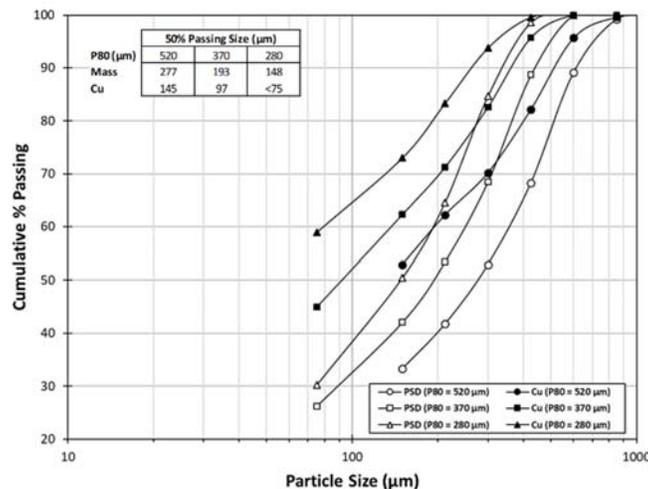


**Figura 4** Filosofía de control para controlar el circuito de molienda de molinos SAG y de bolas para implementar una molienda más gruesa con el fin de elevar el tonelaje y la NMP

## RECUPERACIÓN DE PARTÍCULAS GRUESAS

En las secciones previas se ha analizado la importancia de un seguimiento de tamaño de partícula en tiempo real, de alta resolución y de alta disponibilidad para ejercer un control eficaz de los circuitos de molienda primaria. Independientemente de la filosofía de control y operación adoptada para conseguir una molienda más gruesa, es inevitable que la distribución granulométrica generada por esta molienda más gruesa igualmente contenga una gran cantidad de minerales de cobre valioso en las clases de tamaño más finas. De modo que sin importar qué tan grueso pudiera ser el producto

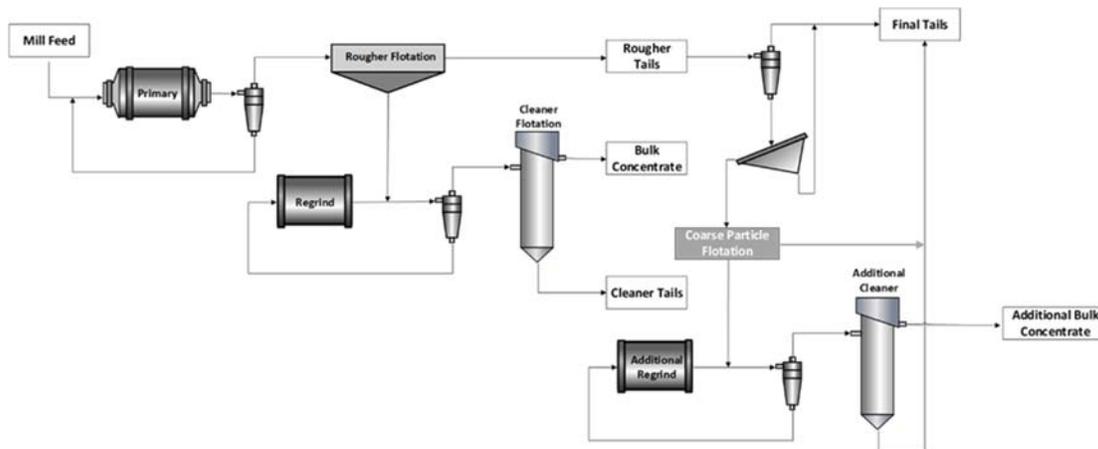
molido, la tecnología de recuperación existente aguas abajo también debe alcanzar una recuperación aceptable de partículas finas. La Figura 5 muestra la variación de los tamaños de partícula y de distribuciones de cobre para la alimentación de mineral de pórfido de cobre molido de acuerdo a tres tamaños de molienda diferentes en un molino de barras en batch. Incluso cuando el tamaño de molienda primaria se aumenta de  $P_{80} = 280 \mu\text{m}$  a  $P_{80} = 520 \mu\text{m}$  (lo que representa un aumento del 86%), más del 50% del cobre igualmente va a estar presente en la clase de tamaño de  $-150 \mu\text{m}$ . Este ejemplo no pretende ser una indicación de que se prevean cambios en planta de las distribuciones de minerales valiosos en función del tamaño de la molienda primaria, sino que sólo refuerza el concepto que de los tamaños de molienda más gruesos en plantas de flotación de cobre igualmente van a producir una alimentación a flotación con minerales de cobre distribuidos en una gama amplia de clases de tamaño. Esto significa que aún se aplican las limitaciones frecuentemente citadas de las tecnologías tradicionales de flotación para recuperar tanto partículas muy finas como muy gruesas.



**Figura 5** Distribuciones granulométricas y de cobre para un mineral de pórfido de cobre de América del Norte molido en tres tamaño de molienda diferentes en un molino batch de barras a escala de laboratorio

El argumento conceptual para las tecnologías de recuperación de partículas gruesas, como parte de una estrategia de planta de molienda gruesa, debe incluir entonces operaciones unitarias para recuperar tanto las partículas gruesas del mineral valioso lo que se obtiene adoptando una estrategia de molienda gruesa, así como de partículas finas de mineral que igualmente estarán presentes en el flujo de alimentación a flotación. El enfoque primario es recurrir a tecnologías de flotación existentes para recuperar partículas por debajo de un “límite de recuperación de partículas gruesas”, el cual en sí depende de la tecnología de flotación instalada, del tamaño y asociación de la partícula del mineral valioso, así como del grado de liberación mineral generada por la tecnología de cominución instalada. Luego se apunta a los minerales valiosos presentes en las partículas más gruesas que dicho “límite de recuperación de partículas gruesas”, utilizando una tecnología de flotación de partículas gruesas que se ha diseñado específicamente para la recuperación de partículas gruesas marginalmente liberadas. A menudo la tecnología de flotación de partículas gruesas exige una distribución de

tamaño operacional estrecha que se puede conseguir utilizando etapas múltiples de pre-clasificación. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de dicho arreglo. En esta configuración las colas rougher se clasifican mediante un ciclón y el underflow se envía a una etapa de clasificación en harnero para producir una distribución de tamaño estrecha para la tecnología de flotación de partículas gruesas. El bajo tamaño del harnero y el overflow del ciclón luego se dirigen a las colas finales de la planta. El concentrado de flotación grueso, con un *mass pull* de aproximadamente 10-25% y una ley de concentrado aproximadamente equivalente a la ley de cabeza de la alimentación al molino, se envía a una etapa separada de remolienda en circuito cerrado que se completa con una etapa de flotación cleaner. Las colas de la etapa de flotación cleaner se envían luego a las colas finales.

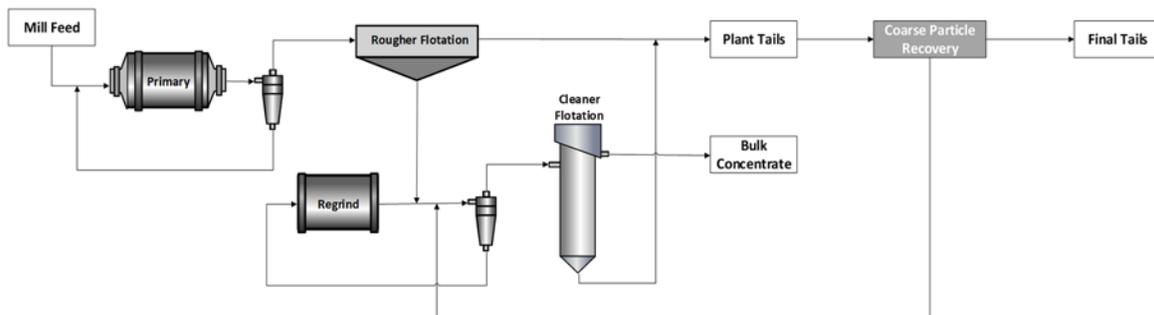


**Figura 6** Diagrama de flujo conceptual para una tecnología de flotación de partículas gruesas que requiere dos etapas de clasificación inicial, así como capacidad de remolienda y circuito cleaner adicionales para manejar el concentrado de partículas gruesas resultante

Las ventajas de cualquier tecnología de flotación de partículas gruesas son importantes ya que ésta puede mitigar las pérdidas en partículas gruesas cuando el circuito de molienda primaria se modifica a un tamaño de molienda primaria más grueso. Esto hace posible un aumento en la producción de metal con un tamaño de molienda más grueso y un mayor tonelaje. Las principales desventajas de esta configuración del circuito en la Figura 6 son el grado de complejidad del flujo de proceso y la necesidad de hacer una clasificación adicional de la pulpa. Al depender del *mass pull* (% de masa flotada) de la etapa de flotación de partículas gruesas, la remolienda adicional y el circuito de flotación cleaner también pueden implicar costos de inversión adicionales considerables para poder obtener las ganancias en producción neta de metal a partir de una molienda primaria más gruesa. Finalmente, la etapa de flotación de partículas gruesas no logra hacerse cargo de las pérdidas de mineral valioso presente en las colas cleaner o en las fracciones de tamaño finas de las colas rougher.

Para abordar las deficiencias del circuito de flotación de partículas gruesas descrito en la Figura 6 se presenta en la Figura 7 un enfoque brownfield alternativo para la recuperación de mineral valioso al emplear una molienda primaria de mayor tamaño. En esta configuración la totalidad de las colas de

la planta, incluidas tanto las colas rougher como las colas cleaner, se dirigen a una operación unitaria conceptual de partículas gruesas que tiene la capacidad de manejar directamente toda la distribución de tamaño del flujo de relaves entrante. Esta tecnología de recuperación también cuenta con una selectividad tan alta que la recuperación de masa resultante llega hasta un 1-3 % con una ley de concentrado igual o superior a la ley de concentrado de la flotación rougher de la planta. Gracias a la baja masa de este flujo de concentrado es posible dirigir este flujo al circuito existente de remolienda de la planta, con una necesidad de modificación mínima para poder gestionar este flujo másico mayor de concentrado.



**Figura 7** Diagrama de flujo conceptual simplificado para una tecnología de recuperación de partículas gruesas capaz de tratar la totalidad del flujo de colas de la planta con tasas de mejora suficientes para dirigir el concentrado resultante directamente al circuito existente de remolienda y flotación cleaner de la planta

CiDRA se encuentra en el proceso de comercializar esta novedosa tecnología de separación, distinta a la flotación, que tiene la capacidad de ampliar las relaciones de recuperación por tamaño con una selectividad muy alta. Los aspectos básicos de la flotación dictan que la interacción de burbuja y partícula (captura, transporte y liberación) son un equilibrio en gran medida determinado por la cinética y la química de la pulpa. Según este nuevo paradigma, el proceso optimizado es capaz de recuperar partículas dentro de una gama amplia de tamaño y con alta selectividad.

## CONSIDERACIONES FINALES

La industria minera está haciendo una transición hacia el procesamiento de partículas gruesas. El presente trabajo le ha entregado al operador de planta algunas herramientas para justificar una estrategia de molienda más gruesa en plantas operativas entre lo que se incluye:

- una metodología para estimar los potenciales beneficios económicos de una molienda más gruesa
- una tecnología basada en impacto de adopción comercial que ofrece un seguimiento de tamaño de partícula en tiempo real para posibilitar una mejor medición y control de la molienda más gruesa
- esquemas potenciales de control para integrar mediciones de tamaño de partícula en tiempo real y llevar a cabo una molienda más gruesa de forma eficaz

- consideraciones de flujo de proceso para una tecnología complementaria de recuperación de partículas gruesas

## REFERENCIAS

Burger, B., Vargas, L., Arévalo, H., Vicuña, S., Seidel, J., Valery, W., Jankovic, A., Valle, R., Nozawa, E., (2011) 'Diseño, Operación y Optimización de Molino SAG de Una Etapa, Yanococha Gold', *Proceeding de la Conferencia Internacional sobre Molienda Autógena, Molienda Semi-autógena y Tecnología de Rodillos de Molienda de Alta Presión, Vancouver, Canadá.*

Giblet, A, Hart, S. (2016) 'Prácticas en el Circuito de Molienda en Newmont', *Conferencia de Operadores de Molienda AUSMIN, Perth, WA.*

Maron, R., O'Keefe, C., Sepúlveda, J.E. (2017) 'Evaluación de los Beneficios del control Automático de Molienda Utilizando Tecnología PST para una Medición Real de Tamaño de Partículas en Línea', *Proceedings de PROCEMIN 2017 13<sup>th</sup> Conferencia Internacional de Procesamiento de Minerales, Santiago, Chile.*

Maron, R., O'Keefe, C., Sepúlveda, J.E. (2018) 'Metodología para Evaluar los Beneficios del Control de Molienda Utilizando Tecnología PST para una Medición Real de Tamaño de Partículas en Línea' *MINEXCELLENCE 2018, 3<sup>rd</sup> Seminario Internacional de Excelencia Operacional en Minería, Santiago Chile.*

Sepúlveda, J.E., Morales, M., Leiva, C. (2018). 'Una Metodología Empírica para la Optimización Operacional del Rendimiento de Molienda SAG: El Caso Pelambres', *Proceedings de PROCEMIN 2018, 14<sup>th</sup> Conferencia Internacional de Procesamiento de Minerales, Santiago, Chile.*