

Metodología para Evaluar los Beneficios del Control de Molienda Utilizando Tecnología PST para Medición Precisa de Tamaño de Partículas en Línea

Robert Maron¹, Christian O’Keefe¹, Jaime Sepulveda²

1. *CiDRA Minerals Processing, USA*

2. *J-Consultores, Ltda., Chile*

RESUMEN

A pesar de la consabida importancia de la finura del producto molido, tanto en la capacidad de la línea como en el desempeño del proceso aguas abajo (generalmente la flotación), menos del 10% de las concentradoras de minerales usa actualmente medición de tamaño de partículas en las aplicaciones de control automático del tamaño de partículas del producto final.

Aunque por décadas se ha utilizado instrumentación para la medición el tamaño de partículas “casi en línea” y comúnmente estos instrumentos se pueden encontrar instalados en las concentradoras más modernas, su disponibilidad y baja frecuencia de medición generalmente resultan inadecuadas para ser usadas en forma confiable en sistemas de control automático. Su baja disponibilidad se relaciona a menudo con problemas con el muestreo de la pulpa y los sistemas de transporte necesarios para llevar las muestras al instrumento de medición.

Recientemente, CiDRA Mineral Processing ha desarrollado una tecnología innovadora para medir el tamaño de partículas en línea y en tiempo real bajo el nombre comercial de CYCLONEtrac™ PST. Esta tecnología ya ha sido probada en varias instalaciones comerciales y ha demostrado casi un 100% de disponibilidad con un requerimiento mínimo de mantenimiento, superando con ello las limitaciones de las tecnologías anteriores.

Quienes deben tomar las decisiones de inversión necesitan estimaciones convincentes y confiables del valor económico esperado que pueden ofrecerles los proyectos de control automático de molienda. En este documento se presenta una metodología para estimar dicho valor desde la instalación de la nueva tecnología de medición de tamaño de partículas PST capaz de rastrear el tamaño de partículas del flujo overflow de cada hidrociclón en forma individual, incorporando con ello opciones únicas para mejorar la estabilidad del proceso y su rendimiento. Basados en registros reales acumulados por largos períodos de tiempo en plantas en operación, el enfoque de evaluación que se presenta en este documento evalúa y destaca la importante mejora potencial que se puede esperar de esta tecnología PST única en su tipo.

Como una extensión del trabajo anterior, este documento presenta los criterios de operación claves que permiten aumentar la producción de la planta y optimizar la producción de metal valioso al identificar el tamaño óptimo de molienda. Como esto normalmente requiere operar muy cerca de los límites físicos del proceso, la medición precisa del tamaño de partículas en tiempo real, tales como la que ofrece el Sistema PST, se transforma en un elemento esencial para el logro real del

máximo valor potencial de cada operación. A modo de ilustración, se muestra una comparación de tres plantas distintas de molienda/flotación de cobre.

INTRODUCCIÓN

Los propietarios y operadores de las concentradoras de mineral constantemente buscan la forma más económicamente atractiva para aumentar la producción de los metales valiosos, por ejemplo, el cobre. Un enfoque lógico es identificar un parámetro clave que tenga el mayor impacto en el rendimiento de las diversas etapas del proceso y luego usar una metodología de análisis holística para determinar de qué forma se puede controlar este parámetro clave para optimizar el resultado final de estas múltiples etapas.

Es bien sabido que el tamaño del producto final de la molienda es un parámetro clave. Sin embargo, menos del 10% de las concentradoras de minerales actualmente utilizan la medición del tamaño de partículas para el control automático del tamaño final del producto, debido principalmente a las limitaciones propias de las tecnologías existentes hasta la reciente introducción de la tecnología PST.

La instrumentación que se ha utilizado para la medición del tamaño de partículas “casi en línea” por décadas generalmente ha tenido problemas de baja disponibilidad ya que las tecnologías fundamentales de medición fueron desarrolladas para otras industrias menos desafiantes y luego adaptadas para el exigente ambiente de los procesos típicos de la concentración de minerales.

La tecnología PST, comercializada a partir del año 2015, es la única tecnología expresamente diseñada para una medición real en línea del producto final de la molienda en el flujo overflow de cada hidrociclón individual, evitando con ello el inmenso desafío de superar las muchas limitaciones impuestas por las tecnologías más antiguas. Con una sencilla tecnología de impacto acústico, un diseño reforzado y la ausencia de partes móviles, ha logrado resolver el problema de disponibilidad reducida y la necesidad de calibración, haciendo con ello que la medición en tiempo real y el control automático del tamaño del producto de la molienda sea una realidad.

Para evaluar el beneficio económico potencial de la implementación de un sistema de medición y control basado en la tecnología PST, los autores han desarrollado previamente una metodología para determinar el tamaño óptimo del producto final de la molienda que genere la máxima Producción Neta de Metálica (NMP) (Maron et.al. 2017) definida como la cantidad neta de metal valioso producida por unidad de tiempo. El método utiliza los datos históricos registrados diariamente o por hora en la planta por un período mínimo de un año e idealmente mayor. Desde ese trabajo inicial, se ha analizado los conjuntos de datos de otras dos plantas. En estos tres casos los análisis han mostrado que, a pesar de existir importantes beneficios potenciales en sólo reducir la variabilidad del tamaño del producto en el proceso, existen también otras ventajas potenciales incluso mayores al obtener un tamaño más grueso de producto que permite aumentar el tonelaje procesado por la planta y proporcionalmente, debido a ello, incrementar también el valor de la NMP. Sin embargo, esto debe

hacerse de forma estable y controlada para evitar los problemas aguas abajo del flujo de producción en el manejo de materiales y evitar el “acordonamiento” de la descarga en los hidrociclones individuales. El sistema PST entrega la información necesaria, no disponible anteriormente, para abordar en forma más acuciosa estas barreras del proceso y de manera operacionalmente segura.

En este documento revisaremos en forma resumida la tecnología PST y luego examinaremos tres formas específicas que están disponibles para aumentar el rendimiento del proceso, i.e. optimizar la NMP, mostrando el papel fundamental de contar con una medición confiable del tamaño del producto de la molienda. Posteriormente, presentaremos una descripción sucinta de la metodología utilizada para determinar el tamaño del producto que maximiza la NMP. Finalmente, abordaremos tres ejemplos reales de aplicaciones de esta metodología.

Este enfoque en el aumento del valor de la NMP se centra en la molienda secundaria o de bolas por una razón importante. En los años 1980 y 1990 generalmente el cuello de botella de los circuitos de molienda de las plantas de concentración de minerales se producía en el molino SAG. Sin embargo, las importantes mejoras incorporadas a los molinos SAG durante las últimas décadas han traspasado el problema del cuello de botella del proceso a los molinos de bolas. Así, el circuito de clasificación del molino de bolas es el área del proceso donde se puede obtener el mayor potencial de incremento de la NMP con importantes beneficios económicos.

MEDICIÓN EN TIEMPO REAL DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN LOS FLUJOS OVERFLOW DE LOS CICLONES BASADA EN IMPACTOS

El rastreo de tamaño de partículas basado en impactos acústicos es un método único para la medición y control del tamaño de malla de referencia del producto en los flujos overflow de los ciclones. La implementación de esta tecnología se centra en el uso de una sonda con sensor que se inserta en el flujo overflow de pulpa a través de una perforación de 2 pulgadas (50 mm) en la tubería de overflow. Las partículas dentro del flujo de la pulpa impactan la superficie de la sonda generando ondas viajeras de tensión dentro de la sonda. Un sensor convierte estas ondas viajeras de tensión en señales eléctricas, y por medio de una técnica patentada de procesamiento de señales, se convierten estas señales en una medición de tamaño de partículas que se entrega cada cuatro segundos. El sensor permanece en contacto constante con muchas partículas del flujo de pulpa y obtiene así información de órdenes de magnitud mayor número de partículas que las tecnologías convencionales basadas en la toma de muestras. También, debido a la ubicación del sensor aguas abajo del hidrociclón y la presencia de un núcleo de aire en ese punto, el sensor no produce ningún cambio en la presión de retorno del hidrociclón y, por lo tanto, no afecta su funcionamiento. La sonda tiene una vida útil de aproximadamente 18 meses debido al desgaste abrasivo ocasionado por el impacto directo de la pulpa. La vida de la sonda depende de la dureza y tamaño de las partículas que, obviamente, es más fina en el flujo overflow si se compara con el flujo de alimentación, permitiendo con ello que la duración de la vida útil de la sonda esté dentro de un

rango aceptable. Actualmente el software entrega sólo un tamaño de malla de referencia que debe incorporarse a la estrategia de control del proceso general. La Figura 1 muestra los componentes principales del sistema PST.

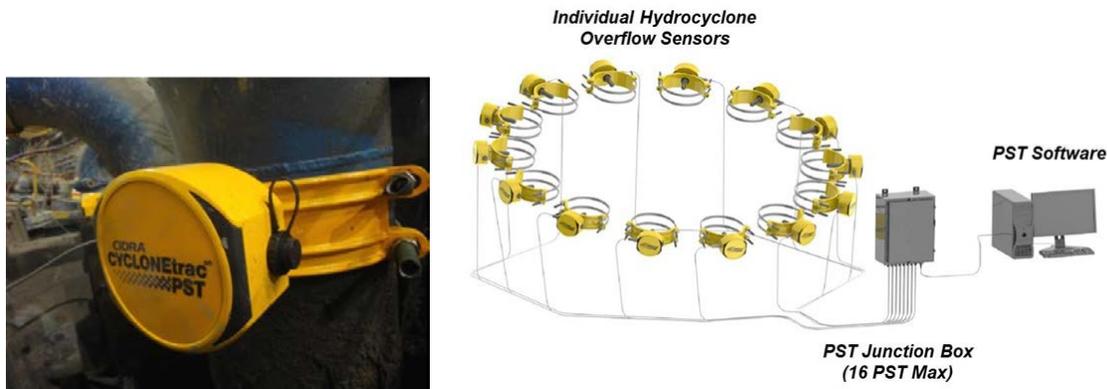


Figura 1 Cabeza del sensor del sistema PST instalado (izquierda) y el sistema con interconexiones (derecha)

MEJORANDO EL RENDIMIENTO DEL PROCESO Y EL PAPEL CLAVE DEL TAMAÑO DEL PRODUCTO

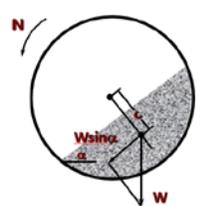
La metodología de análisis de valor que se presentará más adelante muestra que para lograr el máximo aumento de la NMP – que se relaciona directamente con el flujo neto de caja de la operación – deberíamos aumentar el rendimiento y aumentar el grosor del producto final a pesar de una posible reducción de la recuperación. El tonelaje procesado por la planta es igual al índice de potencia a la energía específica. La conocida Ley de Bond relaciona el consumo de energía específica utilizada en la reducción de tamaño con los tamaños de alimentación y del producto con un factor conocido como el Índice de Trabajo de Bond (W_i), lo cual es una propiedad del mineral (Bond, 1985). Como se muestra en la Ecuación 1, estas dos relaciones pueden combinarse para mostrar tres formas paralelas de aumentar el rendimiento utilizando el circuito existente, donde W_i se reemplaza por el ‘índice de trabajo operacional’ (W_{io}) que es la energía real por tonelada medida en la planta. Idealmente, W_{io} debería ser inferior a W_i para una operación de molienda eficiente. La explicación detallada de estas formas es ya conocida y ha sido presentada en diversas ocasiones, también por los autores de este documento (Sepúlveda, 2017), y en las próximas tres sub-secciones se entregará un resumen.

$$T = \frac{P}{E} = \frac{\text{Classification "Effectiveness" Input}}{\text{Grinding Task}} = \frac{(1/W_{io}) \cdot P^1}{10 (1/P_{80}^{0.5} - 1/F_{80}^{0.5})}$$

Ecuación 1 Ley de Bond mostrando las oportunidades de maximizar el tonelaje procesado (T)

Aumentar el consumo de energía del molino

La primera forma de aumentar el tonelaje procesado, como se muestra en la Ecuación 1, es incrementar la energía (P) consumida por el molino de bolas. La ya conocida relación que se muestra en la Figura 2 indica cómo obtener este aumento. De acuerdo con ello, se debería aumentar el nivel de carga del molino (J) y/o la velocidad del molino (N_c) cuando fuera posible.



$$P_{net} = c \cdot \underbrace{W \sin \alpha}_{\text{Torque}} \cdot 2\pi N$$

with:

$$W = 0.02832 \rho_{ap} J (\pi D^2 / 4) L$$

$$c/D \cong 0.447 - 0.476 J$$

$$P_{net} = 0.238 D^{3.5} (L/D) N_c \rho_{ap} (J - 1.065 J^2) \sin \alpha$$

Figura 2 Modelo de Hogg & Furstenau para Consumo de Energía del Molino

Aumentar la eficiencia de clasificación

La segunda forma de aumentar el tonelaje procesado, como se muestra en la Ecuación 1, se relaciona con el índice de trabajo operacional (W_{io}) que se ve afectado por la respuesta de los clasificadores en la interacción de su circuito cerrado con el molino de bolas. El índice W_{io} aparece como un número recíproco en la Ecuación 1, representando así la “eficiencia” de la clasificación, i.e. de qué forma contribuyen los clasificadores a reducir las toneladas procesadas por unidad de energía consumida. La operación más efectiva es aquella en la que el índice W_{io} se ha reducido a su mínimo valor posible. Esto significa que, para una eficiencia energética óptima y un óptimo tonelaje procesado de un proceso de molienda eficiente, es necesario que el contenido de partículas finas en la carga del molino sea lo más baja posible para una tarea determinada de molienda, reduciéndose así el índice W_{io} . Esto se puede lograr operando el circuito bajo las tres siguientes condiciones de operación que se conocen también como el criterio de la “Cuarta Ley”.

- Mínimo % de sólidos en el overflow, sólo limitado por la disponibilidad total de agua,
- Máximo % de sólidos en la descarga, sólo limitado por la indeseada condición de “acordonamiento”,
- Máxima carga circulante, sólo limitada por la capacidad que tengan la(s) bomba(s) y el molino mismo para transportar el volumen requerido de pulpa.

El objetivo colectivo de estas tres condiciones de operación es que los hidrociclones eliminen las partículas finas del circuito tan pronto éstas sean reducidas al tamaño deseado. De esta forma la energía del molino se dirige a la molienda de las partículas gruesas que no han alcanzado el tamaño final de molienda fijado como objetivo, en lugar de utilizarse para seguir moliendo en exceso las partículas que ya han alcanzado el tamaño final objetivo y que no deberían continuar en el molino.

Alivianar la tarea de la molienda

La tercera forma y la más eficiente para aumentar el tonelaje procesado (T) es alivianar la tarea de la molienda, que en la Ecuación 1 se representa como el denominador que contiene el tamaño de la alimentación (F80) a la sección del molino de bolas y el tamaño del producto (P80) descargado a través del overflow de los ciclones. La Ecuación 1 muestra que al acercar los valores de F80 y P80, i.e. reduciendo el tamaño de la alimentación y/o haciendo que el producto sea más grueso, se aumentará el tonelaje procesado (T). En la Figura 3 (izquierda) se muestra una representación gráfica de la tarea de molienda y la relación empírica conocida como la Ley de Bond donde W_{i0} representa la dureza efectiva del mineral. En la metodología de optimización de NMP nos enfocamos en lograr un P80 más grueso, que tiene un mayor efecto en el aumento del tonelaje procesado que reducir el tamaño F80, como se muestra en la Figura 3 (derecha).

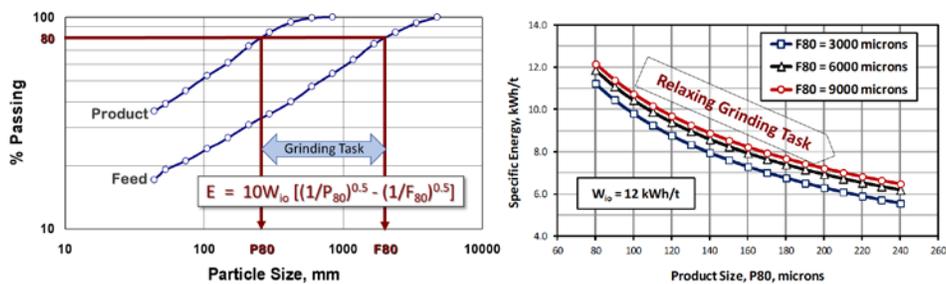


Figura 3 La 'Tarea de la Molienda' (izquierda) y el efecto de alivianarla (derecha)

Sin embargo, cuando se aumentan el P80 y el tonelaje procesado, una medición confiable y en tiempo real del tamaño del producto, como la que ofrece el sistema PST, se vuelve en un recurso extremadamente valioso para implementar este enfoque y a la vez evitar los problemas impuestos por los límites del proceso aguas abajo. Una de las limitaciones típicas del proceso se manifiesta cuando los hidrociclones entran en condición de "acordonamiento" debido a que su capacidad de descarga resulta excedida. La Figura 4 muestra un ejemplo del circuito de clasificación del molino de bolas exigido para obtener un mayor rendimiento y un tamaño de partículas más grande – medido por el sistema PST – hasta el punto en que el hidrociclón excede el límite operacional e ingresa a la condición de acordonamiento de la descarga. Se puede observar claramente el efecto perjudicial que tiene sobre la estabilidad y rendimiento de todos los otros ciclones de la batería pues la batería envía una gran cantidad de material grueso a la flotación aguas abajo del proceso. Los datos se obtuvieron después de la instalación de un sistema PST pero antes de utilizarlo para el control. El aprendizaje más relevante de esta experiencia es que "un ciclón defectuoso daña la batería completa".

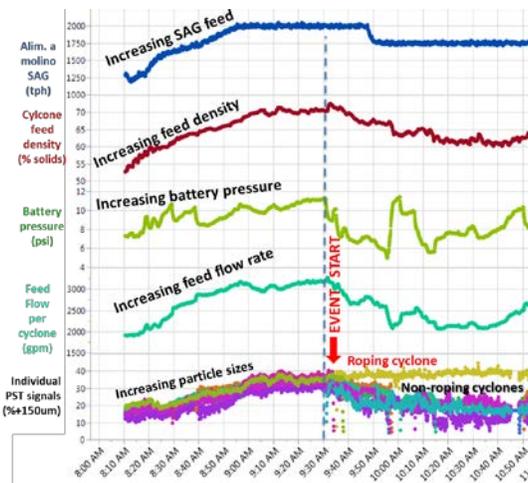


Figura 4 El hidrociclón entra en condición de acordonamiento cuando se excede el límite del proceso

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE VALOR

El objetivo de esta metodología es cuantificar el valor de incorporar la medición de tamaño de partículas en línea de PST al sistema de control automático del proceso en un circuito de molienda/clasificación utilizando los datos históricos, generalmente disponibles en una planta. La metodología utiliza los datos obtenidos diariamente durante un período lo suficientemente prolongado (idealmente más de 1 año) para lograr una evaluación de alto nivel del desempeño operacional general de la planta, enfocándose principalmente en el tonelaje procesado (T) y recuperación (R), los cuales se utilizan para calcular la producción neta de metal valioso (NMP) – el generador principal de flujo de caja – obteniéndose así la función objetivo final para fines de optimización del proceso, como se determina en la siguiente expresión simple:

$$NMP = h T R$$

Ecuación 2 Función objetivo para calcular la Producción Neta de Metal (NMP)

donde h representa la ley del metal valioso que se está recuperando.

Es inherente a esta metodología la observación que el tonelaje procesado (T) y la recuperación (R) son una función del tamaño del producto, así entonces se selecciona el tamaño del producto como la variable independiente. Por lo tanto, la NMP es también una fuerte función del tamaño del producto, y así entonces, debería existir un tamaño óptimo de producto que maximice la NMP y el flujo de caja. Por lo tanto, una medición precisa y el control del tamaño del producto de la molienda surge aquí como una necesidad para un control eficaz del proceso. La correlación del tonelaje procesado y la recuperación con otras variables, como la ley de la alimentación y la dureza del

mineral, también deben examinarse caso a caso y siempre que se disponga de la información. Finalmente, debería también considerarse las restricciones operacionales de la planta (como tonelaje máximo o tasas de flujo, limitaciones del grosor del producto para transporte de pulpa, etc.) ya que pueden limitar la posibilidad de obtener los valores máximos de la NMP en forma consistente.

Tonelaje Procesado, Recuperación y NMP versus Tamaño de Producto

El conjunto de datos mínimos comprende los siguientes cuatro parámetros, muestreados al menos una vez al día por un período mínimo de un año: porcentaje en peso de producto que pasa un tamaño de molienda objetivo (e.g. P80 o % + tamaño de malla objetivo), tonelaje procesado por unidad de tiempo, grado de alimentación, porcentaje de recuperación neta de metal. Cuando se ha aplicado los filtros al conjunto de datos, se realiza la representación del Tonelaje Procesado (T) y la Recuperación (R) vs el Tamaño de Molienda Objetivo, como se observa en la Figura 5 (izquierda) que muestra generalmente nubes de datos ubicadas en la zona del centro lo que hace que la detección de tendencias sea muy poco confiable. Esto se resuelve utilizando una técnica de categorización de datos que otorga el mismo peso a cada categoría de tamaño de producto como se puede ver en las representaciones de tonelaje procesado y recuperación en la Figura 5 (derecha). Entonces se verifica el tonelaje procesado y recuperación después de aplicar los filtros; i.e. el tonelaje procesado debería mostrar ahora una tendencia creciente con un tamaño de partículas en aumento y la recuperación debería mostrar ahora un valor pico en un tamaño único de partículas, ambos de acuerdo con lo previsto por la práctica básica de trituración y flotación. Así entonces, se puede calcular la NMP y su valor máximo, como se muestra en la Figura 5 (derecha).

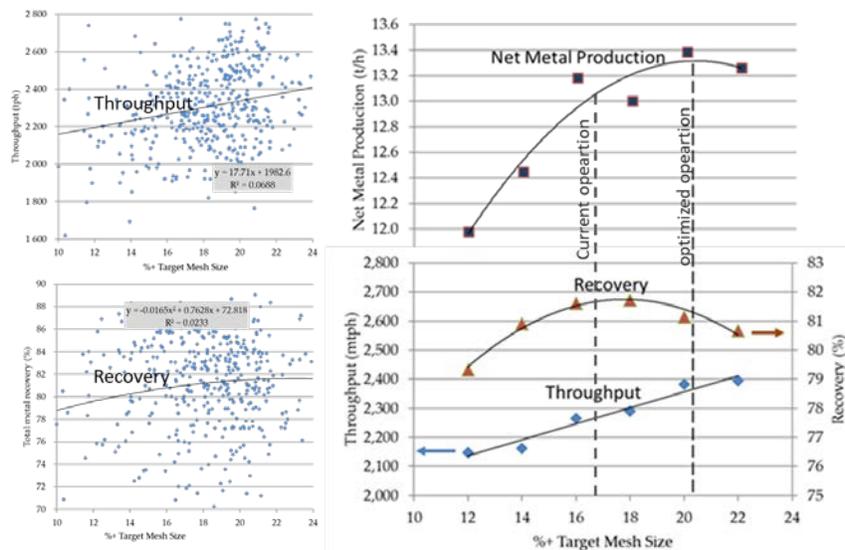


Figura 5 Tonelaje Procesado & Recuperación sin filtro (izquierda) con categorización de datos (derecha) con función objetivo de NMP según la Ecuación 1.

En general, una conclusión importante que se puede obtener de los datos, como se muestra en la Figura 5, es que la NMP máxima generalmente se logra aumentando el tonelaje procesado con un producto más grueso, normalmente sacrificando de cierta forma la recuperación. De esta importante conclusión se desprende un desafío. Cómo medir el tamaño de partículas en forma continua y confiable de manera que estas mediciones puedan incorporarse a la estrategia del sistema de control automático y evitar así pasar por sobre las limitaciones del proceso aguas abajo impuestas por el tamaño de partículas y/o las capacidades de manejo de materiales. La Figura 6 (izquierda) muestra la distribución real del tamaño de partículas sin control en tiempo real y la reducida variabilidad esperada y el aumento de tamaño de producto que se puede lograr utilizando un control de tamaño de partículas en tiempo real como el ofrecido por la tecnología PST. La Figura 6 (derecha) muestra el potencial incremental de la mejora de la NMP sólo reduciendo la variabilidad del tamaño en el producto actual y luego obteniendo un producto más grueso en un mayor tamaño objetivo.

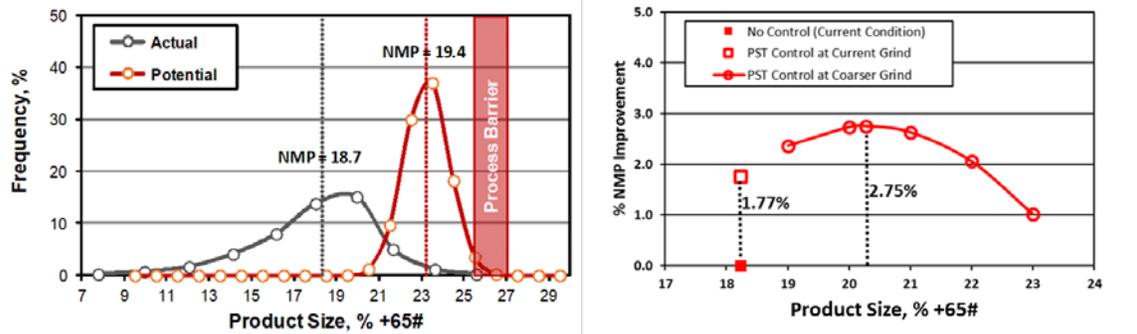


Figura 6 Histogramas de distribución de tamaño real y potencial y la NMP resultante (izquierda) y el porcentaje potencial de mejora de NMP (derecha).

Comparación de Control de Tamaño de Producto en Tres Plantas

Además de los conjuntos de datos analizados anteriormente, se examinaron también otros grupos de datos de dos circuitos SABC adicionales. En la Figura 7 (izquierda) se muestran los histogramas normalizados de la distribución de tamaños de producto en las tres plantas para realizar la comparación y establecer las referencias del rendimiento de las plantas sin control de tamaño de producto en tiempo real. Para una mejor comparación, el eje x ha sido normalizado de acuerdo con el tamaño promedio de producto y el eje y ha sido normalizado según el porcentaje del número total de lecturas. Los datos han sido representados gráficamente sin aplicar el filtro de categorización de datos para mostrar más detalles de la estructura de los datos. Es interesante observar que la variabilidad natural del proceso es similar en todos los casos, considerando que todas son operaciones de cobre porfírico con circuitos de molienda-clasificación parecidos que no incluyen estrategias de control basadas en el tamaño de partículas. Se puede esperar que, al seguir estrategias de control de tamaño de partículas, se reduzca la variabilidad de manera importante.

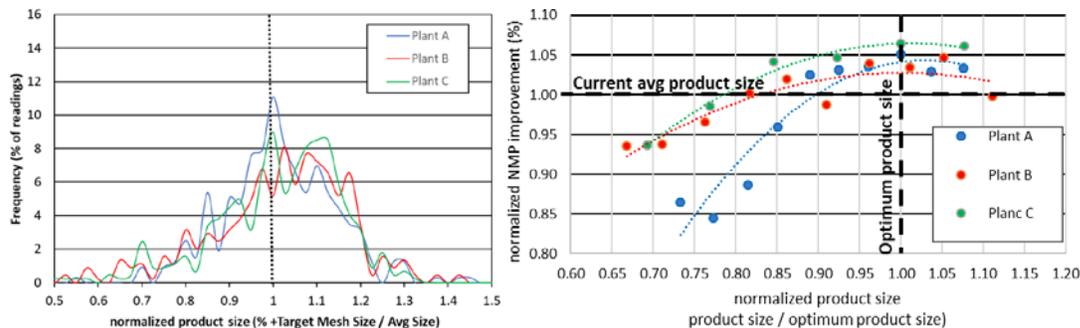


Figura 7 Distribución normalizada de tamaño de producto sin control de tamaño en tiempo real (izquierda); mejora de NMP normalizada

La Figura 7 (derecha) muestra la mejora normalizada de la tasa NMP en las plantas, indicando que el tamaño del producto está generalmente en el rango del 80% al 90% del tamaño óptimo para lograr la máxima NMP, y que las mejoras esperadas de NMP alcanzan entre el 3% y 6% si se aumenta el tamaño de producto promedio actual al tamaño óptimo.

CONCLUSIÓN

El tamaño de partículas final determina el tonelaje procesado y recuperación de la planta y, a partir de eso, la producción de metal valioso que genera el flujo de caja. La ausencia de una medición de tamaño de partículas confiable y en tiempo real ha limitado por décadas la implementación de estrategias de control automático del tamaño de partículas que puede permitir que las plantas maximicen la producción de metal valioso. La nueva tecnología PST para la medición de tamaño de partículas en tiempo real y altamente confiable permite ahora que las plantas puedan implementar sus estrategias de control con el fin de moler más grueso, aumentar el tonelaje procesado y optimizar la producción de metal, y así acercarse con mayor precisión a los límites impuestos por el proceso y al mismo tiempo monitorear y controlar el tamaño del producto para evitar los problemas aguas abajo del proceso. Hemos descrito las estrategias operacionales fundamentales que deberían ponerse en práctica para maximizar la producción de metal valioso y una metodología muy sencilla para estimar los beneficios económicos resultantes. Los datos obtenidos de las tres plantas muestran una variación típica del tamaño de producto obtenido en los procesos que no cuentan con un control automático basado en la medición de tamaño de partículas en

tiempo real. Los datos también muestran que es posible obtener aumentos significativos de varios puntos porcentuales en la producción de metal valioso.

REFERENCIAS

Bazin, C., Grant, R., Cooper, M, Tessier, R. (1994), '*Prediction of Metallurgical Performances as a Function of Fineness of Grind*', Canadian Mineral Processors Annual Conference, CMP Proceedings 1964-1998, (Science Direct, viewed 03 Aug 2017, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0892687594901155>).

Bond, F.C., (1985) Testing and calculations. SME Mineral Processing Handbook. Weiss, N.L. (Ed.), Section 3A: General Aspects of Comminution, pp. 16– 27.

Edwards, R., & Vien, A. Desbiens, A. (Ed.). (1999). '*Application of a model based size-recovery methodology*'. Canada: Canadian Inst of Mining, Metallurgy and Petroleum.

Maron, R., O'Keefe, C., Sepulveda, J. (2017), '*Assessing the Benefits of Automatic Grinding Control Using PST Technology for True On-Line Particle Size Measurement*', PROCEMIN-GEOMET 2017, 13th International Mineral Processing Conference and 4th International Seminar on Geometallurgy, Santiago, Chile, October 4-6, 2017, Gecamin Conferences for Mining.

Sepulveda, J.E., '*Operational Guidelines for an Energy Efficient Grinding / Classification Circuit*', Coalition for Energy Efficient Comminution (CEEC) Forum – Mining Energy Innovation Forum – Energizing Our Future, Santiago, Chile, October 4, 2017. Coalition for Energy Efficient Comminution (CEEC).