

Evaluación de los Beneficios del Control Automático de Molienda Utilizando Tecnología PST para Medición Precisa de Tamaño de Partícula en Línea

Robert Maron*¹, Christian O'Keefe¹, Jaime Sepulveda²

1. CiDRA Minerals Processing, USA

2. J-Consultants, Ltd. Chile

RESUMEN

A pesar de la bien conocida importancia de la fineza del producto molido, tanto en la capacidad de línea como en el desempeño del proceso aguas abajo (generalmente la flotación), menos del 10% de las concentradoras de minerales usan actualmente la medición de tamaño de partículas en tiempo real en las aplicaciones de control automático del tamaño de partícula del producto final.

Aunque por décadas se ha utilizado instrumentación para la medición el tamaño de partícula “casi en línea” y a pesar de que estos instrumentos se encuentran instalados en la mayoría de las concentradoras más modernas, su disponibilidad y baja frecuencia de medición generalmente resultan inadecuadas para ser usados en forma confiable en sistemas de control automático. Su baja disponibilidad se relaciona a menudo con problemas con los sistemas de recolección de muestras y manejo de pulpas que son necesarios para llevar las muestras al instrumento de medición de tamaño de partícula.

Recientemente CiDRA Mineral Processing ha desarrollado bajo el nombre comercial de Particle Size Tracking (PST) (*Rastreo de Tamaño de Partícula*), una tecnología innovadora para medir el tamaño de partícula en línea y en tiempo real. Esta tecnología ya ha sido probada en varias instalaciones comerciales y ha demostrado un casi 100% de disponibilidad con un requerimiento mínimo de mantención, superando con ello las limitaciones de las tecnologías anteriores.

Los ejecutivos a cargo de la toma de decisiones de inversión necesitan de estimaciones convincentes y fiables del valor económico esperado de cualquier proyecto de automatización del control de molienda. Este trabajo técnico presenta una metodología para estimar el valor económico generado al instalar el nuevo sistema de medición de tamaño de partícula PST, capaz de rastrear el tamaño de partícula en el overflow de cada hidrociclón, así añadiendo considerables nuevas opciones para mejorar la estabilidad y rendimiento del proceso. El método aquí descrito, basado en datos operacionales de una planta y recolectados durante más de un año, evalúa y resalta la potencial contribución a ser esperada de esta tecnología única, PST.

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

INTRODUCCIÓN

La optimización del desempeño metalúrgico de una planta de procesamiento de minerales a escala industrial en función al tamaño del producto de molienda es una tarea importante, pero, a menudo, compleja. Una forma directa de hacerlo es cambiando el tamaño del producto de la molienda en la planta a escala real y observando los efectos sobre la flotación, sin embargo, los efectos reales pueden ser enmascarados por la gran cantidad de perturbaciones inesperadas que comúnmente se producen en las operaciones de molienda y los circuitos de flotación (McKay, 2014). Se han desarrollado simuladores de molienda y flotación bastante útiles, sin embargo, la integración de ambos puede resultar compleja y, fundamentalmente, son sólo modelos de la planta a escala industrial y, por lo tanto, tienen limitaciones (Schwarz, S. 2013). También se han desarrollado métodos que utilizan una serie de pruebas de laboratorio realizadas en muestras tomadas del circuito industrial y que han demostrado ser útiles y han ganado aceptación (Bazin, 1994) (Edwards, 1999).

Estos tres métodos y las combinaciones mencionadas anteriormente son ciertamente útiles, pero demandan tiempo y gastos considerables. Además, introducen incertidumbre en los resultados debido a las limitaciones de las simulaciones, las diferencias entre las pruebas en planta y laboratorio y las extrapolaciones a partir de los datos tomados de grupos pequeños de muestras recolectadas en marcos de tiempo reducidos. Sin embargo, a menudo es deseable obtener una evaluación del rendimiento de una planta existente en función del tamaño del producto de la molienda con menos tiempo y menos gastos, y además con mayor confianza en que los resultados son representativos de la operación a escala industrial.

La metodología que se presenta en este trabajo utiliza datos históricos de la planta, comúnmente disponibles y que abarcan un período extenso de tiempo, para evaluar el desempeño actual y predecir la mejora que se puede obtener si se implementa el control automático del tamaño del producto de la molienda con una tecnología confiable de medición de tamaño de partícula en línea.

MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EL HIDROCICLÓN EN TIEMPO REAL A PARTIR DE IMPACTOS

Principio de Operación

El rastreo del tamaño de partícula a partir de ondas acústicas generadas por impactos es un método único para la medición y control del tamaño de malla del overflow de los ciclones. La implementación de esta tecnología se centra en una sonda sensor que se inserta en la tubería de overflow de cada hidrociclón a través de un orificio de 2 pulgadas (50 mm) (Figura 1). Las partículas en la pulpa impactan la superficie de la sonda generando ondas que viajan dentro de la sonda. Un sensor convierte estas ondas en señales eléctricas y por medio de técnicas de procesamiento patentadas, se convierten estas señales en una medición de tamaño de partícula que se genera cada cuatro segundos. Este sensor está en contacto constante con diversas partículas en el flujo de pulpa y así obtiene

información de órdenes de magnitud de más partículas que las tecnologías tradicionales basadas en la obtención 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 contrapresión del hidrociclón ni tampoco 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 partículas que, obviamente, son más finas en el de 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.



Figura 1 Sensor de rastreo de tamaño de partícula CYCLONetrac PST montado en la cañería de overflow del hidrociclón

Implementación en Planta de la Tecnología CYCLONetrac PST

La implementación en la planta del sistema de rastreo de tamaño de partícula PST incluye una sonda de medición con sus componentes electrónicos asociados en el overflow de cada ciclón y una caja de interconexión que consolida las señales procesadas provenientes de los sensores individuales y las envía a un computador que está generalmente ubicado en la sala de control. El procesamiento final se realiza en ese computador y la información resultante sobre el tamaño de partícula es transferida al sistema de la planta por medio de un servidor OPC integrado. Actualmente el software entrega sólo un tamaño de malla de referencia que debe incorporarse a la estrategia de control del proceso general. En la Figura 2 se describe este sistema (Cirulis, 2015).

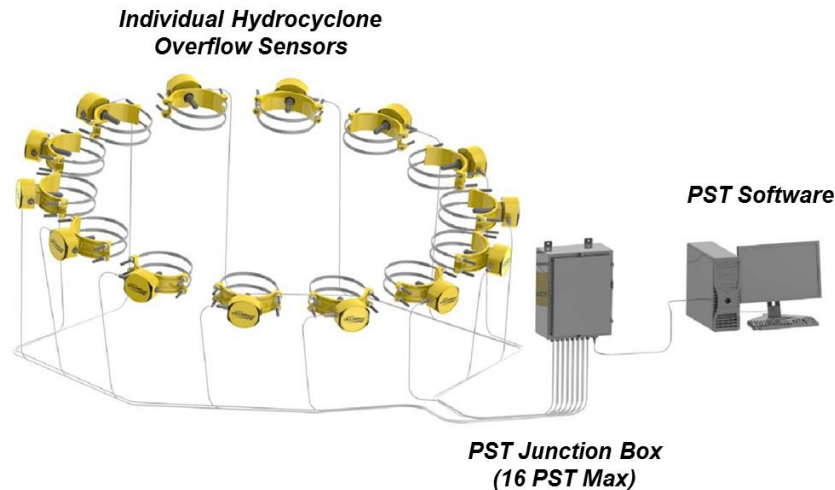


Figura 2 Diagrama de instalación de PST a escala industrial

Tanto los métodos de medición en línea como el PST, basado en el impacto de partículas, como las alternativas de medición de tamaño de partícula “casi en línea”, basadas en la difracción láser, ultrasonido o pinzas, requieren ser calibrados por medio de la correlación de sus señales con partículas de referencia o muestras reales de la pulpa analizadas con procedimientos estándares de laboratorio (Wills, 2016). El sistema CYCLONetrac PST, basado en el impacto de partículas, también necesita de calibración para compensar las influencias del tipo de ciclón y el lugar de instalación del sensor. Para asegurar una buena calibración compuesta que pueda aplicarse a todos los ciclones de una batería se deben tomar muestras del overflow de cada uno de los ciclones de la batería. Una vez calibrado el sistema ya no es necesario volver a repetir el procedimiento de calibración al reemplazar la sonda por desgaste, siempre y cuando se use el mismo modelo de sonda. Además, se debe tomar muestras más allá del rango de operación esperado de los ciclones para asegurar una medición precisa cuando el ciclón está trabajando fuera de su rango normal de operación. Los rangos de calibración deben cubrir rangos por encima y por debajo de las condiciones operacionales, incluyendo, pero no limitándose a, eventos de acordonamiento, arranques, detenciones y vaciados del molino. De esta manera se evitan las incertidumbres en la medición que se producen cuando se utilizan modelos de calibración para extrapolar las mediciones más allá del rango calibrado. Para facilitar el rápido procesamiento de las muestras se utiliza un tamaño único de tamiz con un procedimiento de tamizado húmedo de forma de generar un número calibrado, ya sea el porcentaje de material que pasa o es retenido por un tamaño de tamiz de referencia, por ej. X% +100#.

Nuestra experiencia demuestra que las señales calibradas resultantes tienen una desviación estándar inferior a 4,5 puntos porcentuales de los valores reales correspondientes. Una parte indeterminada pero significativa de esta desviación estándar puede ser atribuida al procedimiento de recolección de la muestra. Los flujos overflow del ciclón, generalmente, ofrecen un acceso limitado al muestreo, por lo tanto, obtener una muestra transversal completa del flujo normalmente resulta difícil. En su lugar se realizan cortes de muestreo de inmersión o cortes transversales parciales. Como ejemplo, en la Figura 3 se muestra los resultados obtenidos en el comisionamiento de una concentradora de fosfato (O’Keefe, 2016).

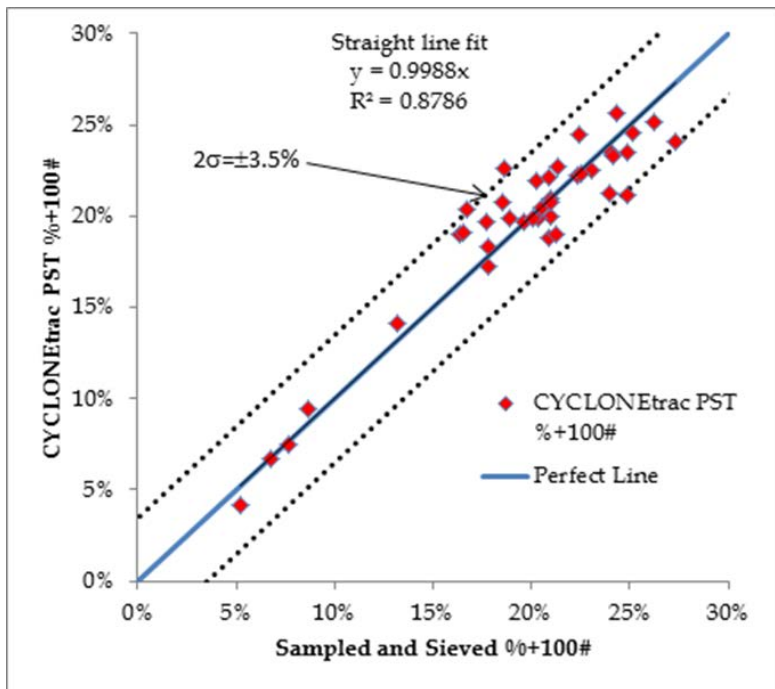


Figura 3 Ejemplo de resultados obtenidos por PST de un ciclón individual comparado con mediciones obtenidas por muestreo y tamizado

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE VALOR

Objetivo

El objetivo de este trabajo es cuantificar el valor de incorporar la medición de tamaño de partícula del sistema 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 datos obtenidos a diario durante un período prolongado (idealmente más de 1 año) para lograr una evaluación de alto nivel del desempeño operacional general de la planta, enfocándose principalmente en la capacidad de tratamiento (T) y recuperación (R), siendo la producción neta de metal (NMP) el objetivo final para la optimización del proceso, como se determina en la siguiente expresión simple:

$$NMP = h T R \tag{1}$$

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

Es propio de esta metodología que la capacidad de procesamiento (T), recuperación (R) y la NMP se correlacionen estrechamente con el tamaño del producto de la molienda, de manera que en cada una de las aplicaciones existe un tamaño óptimo de molienda que maximiza la NMP; es decir, el valor neto a ser logrado en la operación. Por lo tanto, una mejor medición y control del tamaño del producto de la molienda surge aquí como una necesidad para un control eficaz del proceso. La correlación de la capacidad de procesamiento 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, también deben considerarse las restricciones operacionales de la planta (por

ejemplo, tonelaje o tasas de flujo máximas, limitaciones del grosor del producto para el transporte de pulpa, etc.) pues pueden limitar la obtención consistente de los valores esperados de NMP. Esta metodología es apreciablemente más sencilla que aquellas dependientes de pruebas de laboratorio y muestreo de los circuitos industriales (Bazin, 1994) (Edwards, 1999).

Datos de entrada

Se debe obtener registros diarios de la operación por un período mínimo de 6 meses, y de preferencia por un año o más. La calidad de los datos es importante, pero principalmente los datos relacionados con el tamaño del producto. La frecuencia y metodología para obtener las muestras de pulpa debe comprenderse con claridad e idealmente deberían usarse muestreadores automáticos modernos y de buen diseño que obtengan muestras cada dos a cuatro horas y que posteriormente se combinen para producir una muestra compuesta del día. Las muestras compuestas deben procesarse en un laboratorio metalúrgico utilizando un adecuado control de calidad para obtener el tamaño del producto de molienda. Generalmente esto se define con un número único, el P80, que se puede obtener fácilmente a partir la medición de distribución de tamaño de partículas completas. Sin embargo, por conveniencia, se usa generalmente el porcentaje que pasa por una malla única, y el tamaño de malla seleccionado normalmente es de un tamaño aproximado a P80. En la Figura 4 se muestra un ejemplo del Conjunto de Datos de Entrada y el NMP calculado a partir de la Ecuación 1 descrita anteriormente.

INPUT DATA					CALCULATED
Date	Size (%+Mesh#)	Throughput (tph)	Feed Grade (%Cu)	Recovery Total (%Cu)	NMP (tph)
2-Jan	16.8	2,775	0.69	82.1	15.7
3-Jan	17.3	2,381	0.60	77.5	11.0
4-Jan	20.7	2,864	0.57	79.0	12.8

Figura 4 Ejemplo, conjunto de datos de entrada y producción calculada

Filtración, Análisis y Categorización de Datos

Los días que arrojan datos evidentemente defectuosos se eliminan. El indicador principal de la capacidad de molienda es el promedio de toneladas secas de mineral triturado por hora real de operación (tph) cada día. Se debe prestar especial atención a los días con bajo % de utilización de la planta pues en estos días los promedios de tph pueden caer fácilmente fuera de los rangos normales de operación. El objetivo de este método de filtración de datos es contar finalmente con la máxima cantidad posible de puntos de datos confiables.

Dado que la mayoría de las plantas operan en un punto nominal de desempeño, los puntos de datos de cada día tienden a agruparse alrededor de un rango central, como puede observarse claramente cuando los datos son representados gráficamente. Sin embargo, esta nube de datos concentrada en el centro hace difícil detectar una tendencia subyacente. La categorización de datos es una técnica que se usa para manejar este problema dado que otorga el mismo peso a cada categoría en lugar de dar

el mismo peso a cada punto de datos (Wikipedia, 2017). De esta manera, las categorías con un mismo peso pueden revelar con mayor precisión la tendencia subyacente de los datos, siempre que existan suficientes puntos de datos por categoría en el rango completo de interés. Como un ejemplo de cómo los datos no categorizados pueden inducir a resultados erróneos, si la mayor cantidad de los puntos de datos están concentrados en una zona central donde la tendencia subyacente es más bien plana si se compara con las zonas no centrales, entonces la tendencia ajustada a los datos no categorizados será plana porque los puntos de datos fuera de la zona plana del centro tendrán una influencia relativamente baja y no serán capaces de revelar la tendencia subyacente. En este caso, donde estamos buscando las tendencias en la capacidad de producción, recuperación y NMP con relación al tamaño del producto, los datos se categorizaron según el tamaño del producto como se muestra en la Figura 5. Se encontró que rangos iguales de 2% +Tamaño de Malla Objetivo (TMS por su sigla en inglés) producían los resultados estadísticamente más válidos.

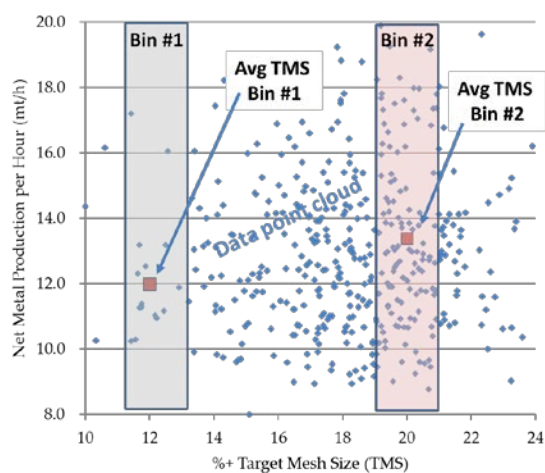


Figura 5 Ejemplo de categorización de datos; puntos no categorizados y promedio de categorización

Capacidad de Procesamiento vs Tamaño de Producto

La primera correlación básica por examinar es la relación de capacidad de procesamiento de mineral vs el tamaño del producto, como se muestra en la Figura 6. Generalmente esta relación mostrará que un tamaño de molienda más grueso (mayor % + TMS) corresponde a una mayor capacidad de procesamiento. Este gráfico muestra que el circuito de molienda generalmente opera entre 15% y 25% +TMS con el consiguiente aumento de capacidad de procesamiento con un tamaño de producto más grueso.

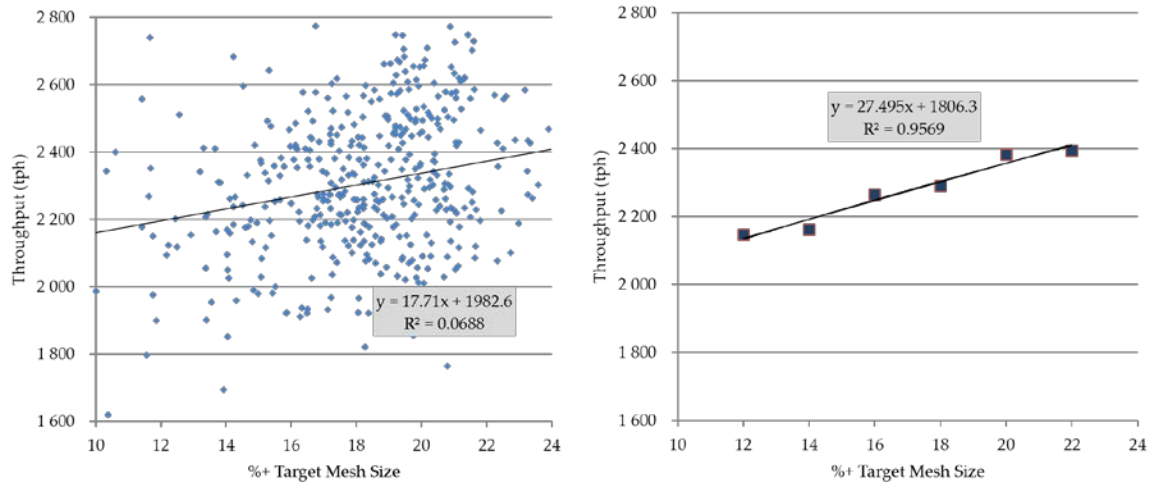


Figura 6 Capacidad de Procesamiento vs Tamaño del Producto, con y sin categorización de datos

Como indicado, los promedios de los rangos que se muestran en el gráfico de la derecha muestran una tendencia lineal aceptable (R^2 alto) para la capacidad de procesamiento vs la correlación de TMS, que no podría ser observada con tanta claridad en el gráfico de la izquierda que muestra todos los puntos de datos con la variabilidad de proceso natural de la operación diaria. Como se describió anteriormente, la alta incertidumbre de ajustar una línea de regresión a la nube de puntos sin usar la categorización de datos significa que la inclinación de la línea de regresión en el gráfico de la izquierda es muy poco confiable, como lo indica el valor muy bajo de R^2 . Sin embargo, cuando se usa la categorización, como se muestra en el gráfico de la derecha, la inclinación puede considerarse confiable, como lo indica el alto valor de R^2 .

Recuperación vs Tamaño de Producto

La siguiente correlación básica por examinar es la relación de la recuperación (del metal objetivo) con el tamaño del producto, como se muestra en la **Figura 7**. Generalmente la relación mostrará una recuperación máxima a un tamaño particular de producto, con menor recuperación en los rangos más finos y gruesos debido a las pérdidas en la recuperación de la flotación.

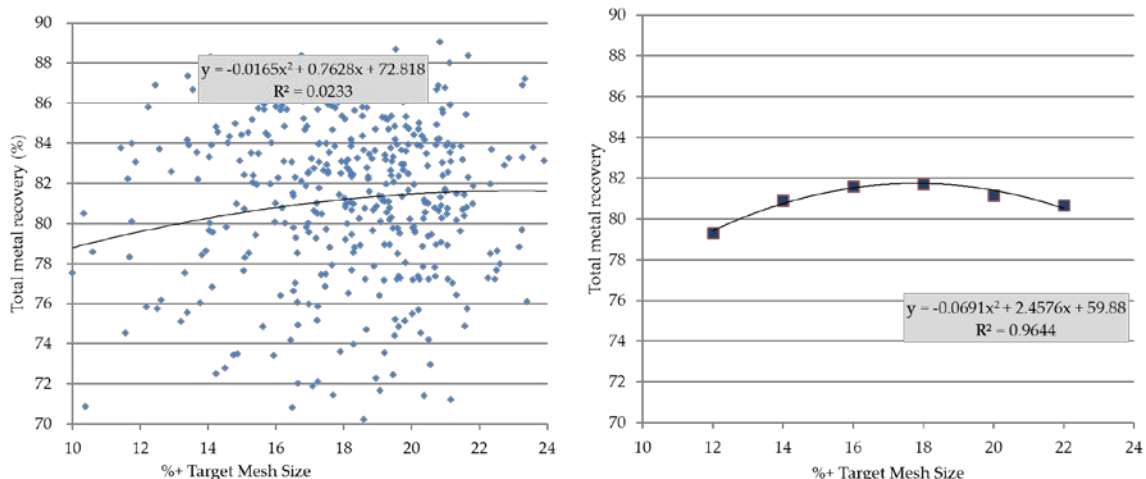


Figura 7 Recuperación vs Tamaño del producto

Nuevamente, los promedios de las categorías muestran una clara tendencia de la correlación que es difícil de identificar directamente a partir de los datos brutos.

Producción Neta de Metal (NMP)

Al haber examinado la relación de la capacidad de procesamiento y la recuperación vs el tamaño del producto, la NMP puede calcularse utilizando la técnica de categorización de datos descrita anteriormente, como se muestra en la Figura 8.

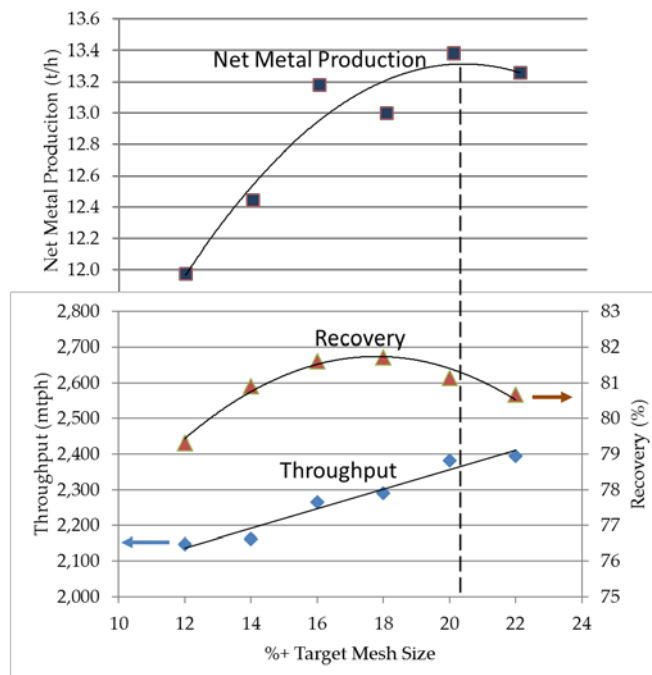


Figura 8 Función objetivo (arriba) de la Producción Neta de Metal (NMP) según la Ecuación 1

Ganancia de Producción Neta de Metal a partir de un Mejor Control de Tamaño de Producto

La NMP de la operación del ejemplo es de 13,05 tph utilizando la medición de tamaño de producto y estrategia de control actuales. Si la planta operara en su nivel máximo de 20,3% +/- 1% de TMS, el NMP aumentaría en un 2% a 13,3 tph, como se muestra en la Figura 9. Más aún, es bien sabido que la estabilidad del proceso se relaciona con una mejor operación general del circuito (Wysowl, 2017). En otras palabras, se puede lograr mayor ganancia de NMP al reducir la variabilidad del proceso a través de un mejor control del tamaño del producto que el que se ha demostrado en el análisis anterior.

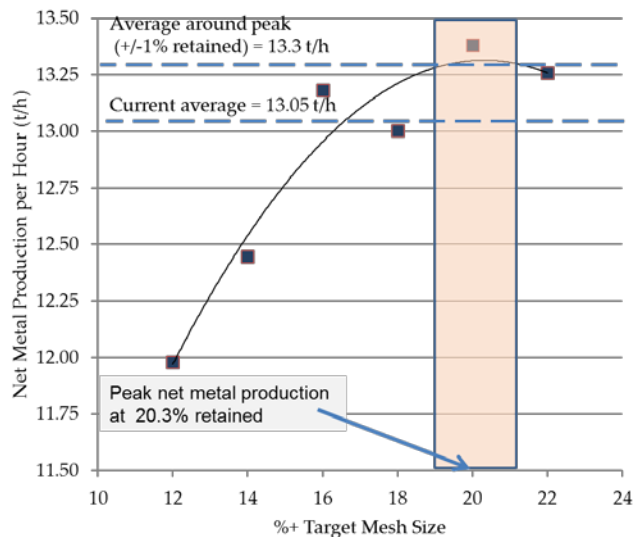


Figura 9 Producción Neta de Metal optimizada al operar a +/-1% de 20,3% +TMS

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Contar con una medición confiable del tamaño del producto es clave para el control operacional eficaz de los sistemas de molienda/clasificación, particularmente en los casos donde la siguiente etapa del proceso aguas abajo es la concentración por flotación selectiva. Como se ha analizado en esta publicación, la tecnología PST desarrollada por CiDRA ha demostrado ser la más valiosa en entregar información precisa y en línea en relación con el tamaño de partícula y que, adecuadamente incorporada a la estrategia de control del sistema general respectivo, permite la maximización continua de los beneficios que se pueden lograr para el proceso.

Al reconocer que el tamaño del producto se relaciona fuertemente tanto con la capacidad de procesamiento de la línea y la recuperación de metal valioso, se puede entonces evaluar el punto de ajuste del tamaño objetivo del producto que maximizará permanentemente la función objetivo, definida como la tasa de Producción Neta de Metal (NMP por su sigla en inglés), expresada en toneladas de metal valioso producido por hora de operación.

En la metodología de evaluación de valor propuesta en este trabajo, se encontró que las técnicas de “categorización de datos” son muy útiles e ilustrativas en el análisis de registros operacionales reales, generalmente afectados por variaciones de bastante envergadura en el proceso normal e inestabilidades imprevistas que tienden a enmascarar las interacciones subyacentes entre las condiciones más relevantes del proceso.

Una ventaja importante de la metodología aquí descrita es que sólo se basa en los datos de la planta existente y no requiere la ejecución de trabajo de laboratorio complejo.

El 2% de aumento en la Producción Neta de Metal prevista por este análisis, más cualquier otro beneficio que pueda obtenerse de reducir la variabilidad del proceso al incorporar la tecnología PST en la estrategia de control, es consistente con los incrementos obtenidos anteriormente en operaciones donde se ha instalado el sistema PST.

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>).
- Cirulis, D. (2015) 'Process Optimization Using Real-Time Tracking of Coarse Material in Individual Cyclone Overflow Streams', *METPLANT 2015 Conference, Perth, Western Australia, Sept 7-8, 2015*, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Perth
- Edwards, R., & Vien, A. Desbiens, A. (Ed.). (1999). *Application of a model based size-recovery methodology*. Canada: Canadian Inst of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- McKay, J., Ynchausti, R., Gritton, K. (2014) 'Benefit Analysis of Implemented Supervisory Control Systems', KnowledgeScape, Salt Lake City, UT, USA. (viewed Aug 03, 2017, <https://kscapedotcom.files.wordpress.com/2014/05/benefits.pdf>).
- O'Keefe, C., Maron, R., Cirulis, D., Medina, J. (2016) 'Survey of Real-Time Individual Cyclone Particle Size Tracking (PST) in Multiple Concentrators', Proceedings of 5th International Congress on Automation in Mining, Automining 2016, Nov 30 – Dec 2, 2016, Antofagasta, Chile, (Gecamin, viewed Aug 03, 2017, <https://gecamin.com/automining/english/proceedings>)
- Schwarz, S., Richardson, J.M. (2013) 'Modeling and Simulation of Mineral Processing Circuits Using JKSIMMET and JKSIMFLOAT', SME Annual Meeting, Feb 24 – 27, 2013, Denver, CO.
- Wikipedia (2017), *Data Binning*, viewed 03 Aug 2017, https://en.wikipedia.org/wiki/Data_binning.
- Wills, B., Finch, J., (2016) *Mineral Processing Technology*, 8th Edition, Section 4.5, page 105, Elsevier, Ltd., UK.
- Wysowl, J. (2017) 'Optimising Continuous Operations', *Newsletter No. 33, Wysowl Pty Ltd.*, Queensland, Australia.