

Optimización de Circuitos de Molienda Secundaria con Rastreo de Tamaño de Partículas en tiempo real en cada ciclón

Dylan Cirulis, Robert Maron*, Christian O’Keefe y Juan Francisco Medina
CiDRA Minerals Processing, USA

RESUMEN

La baja de los precios de los metales, que se ha mantenido durante este periodo prolongado, ha hecho que los operadores mineros dirijan sus esfuerzos ya no a adquirir nuevos activos, sino a aumentar la capacidad y optimizar los activos ya existentes para incrementar el rendimiento, la recuperación de mineral y eficiencia. Este cambio en el enfoque, resultado de una situación de crisis, ha sido estudiado en otras industrias de características cíclicas y se ha entendido que presenta una oportunidad para realizar cambios importantes, siendo uno de ellos, la optimización de los activos.

Para identificar el proceso de optimización de activos que ofrezca el mejor beneficio económico, se debería buscar métricas de rendimiento claves que no estén siendo debidamente abordadas por las tecnologías existentes. Una de las métricas más importantes es la medición del tamaño de partículas del producto obtenido de los circuitos de molienda que alimentan la flotación gruesa. Durante años, se ha utilizado analizadores convencionales para medir el tamaño de partículas en línea en este tipo de aplicaciones; sin embargo, en muchas plantas la disponibilidad alcanzada ha sido inaceptablemente baja impidiendo con ello su uso dentro de un rango confiable en un proceso de control en tiempo real. Además, los requerimientos de mantención han resultado ser altos debido a la falta de solidez y la complejidad de los sistemas de muestreo. Es también importante indicar que, dado que sólo miden el resultado consolidado de una batería completa, no permiten usar estrategias de control que puedan identificar y atender individualmente cada ciclón que esté operando en forma deficiente.

La búsqueda del mejor proyecto de optimización de activos ha llevado a diversas plantas concentradoras a seleccionar e implementar una novedosa tecnología de rastreo de tamaño de partículas en cada ciclón, tanto por las deficiencias de las tecnologías existentes como por las excelentes métricas financieras ofrecidas por la nueva tecnología, como resulta ser la recuperación del capital invertido en menos de un año.

Este documento presenta la tecnología de Rastreo de Tamaño de Partículas (PST) CYCLONEtrac que ya ha sido instalada en nueve plantas concentradoras de la gran minería. Los datos obtenidos en planta se presentarán a través de los beneficios obtenidos de un proceso de control optimizado al usar estrategias basadas en mediciones efectuadas a cada ciclón y mediciones consolidadas de la batería completa de ciclones.

INTRODUCCIÓN

Las plantas de procesamiento de minerales generalmente usan molinos en circuitos cerrados con hidrociclones para producir un producto con una distribución de tamaño de partícula específica y obtener una recuperación óptima del proceso aguas abajo. La instrumentación existente para la medición del tamaño de partículas actualmente se considera como un equipo estándar en la mayoría de las plantas concentradoras modernas. Sin embargo, el nivel de disponibilidad de la instrumentación es muy bajo a veces, principalmente debido a los exigentes requerimientos de mantenimiento del analizador y los sistemas de muestreo asociados.

CiDRA Minerals Processing Inc. ha desarrollado una tecnología innovadora y sólida que proporciona un sistema altamente confiable y con bajo requerimiento de mantención para la medición en línea del tamaño de partícula en el rebose de cada ciclón. El diseño de este sistema ha sido concebido como un sensor de inserción sin partes móviles que entrega la tendencia del parámetro de tamaño de partícula deseado en la forma de porcentaje retenido en el tamiz (por ejemplo, % +100 malla). El sistema no requiere de muestreo ni circuito de tubería de transferencia de muestras, que tiende a obstruirse, evitándose así los exigentes requerimientos de mantención.

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El rastreo de tamaño de partícula por medio del impacto acústico es un método único para medir y monitorear los tamaños de partículas en las líneas de overflow del ciclón. La implementación de esta tecnología se basa en una sonda que se inserta dentro del flujo de pulpa a través de un orificio de dos pulgadas (50 mm) en la tubería de overflow, como se muestra en la Figura 1. Las partículas que viajan dentro del flujo de la pulpa impactan la superficie de la sonda generando con ello ondas viajeras de tensión dentro de la sonda. Un sensor convierte estas ondas viajeras de tensión en una señal eléctrica y las técnicas patentadas de procesamiento traducen estas señales en la medición del tamaño de partícula que se entrega cada cuatro segundos. El sensor muestrea efectivamente un pequeño porcentaje del flujo de pulpa que es órdenes de magnitud mayor que el muestreado por otras tecnologías convencionales que usan muestreadores en línea y que no toman muestras de cada hidrociclón. También, debido a la ubicación del sensor que está aguas abajo del hidrociclón y la presencia de un núcleo de aire en ese punto, el sensor no produce cambio alguno en la presión de retroceso en el hidrociclón.



Figura 1 CYCLONetrac PST – Instalado en tubería de overflow (izquierda); ilustración del principio de operación (derecha)

Los métodos de dimensionamiento en línea del flujo de overflow, ya sea por medio de difracción, ultrasonido, basados en el tamaño o el impacto, necesitan calibración por correlación de sus señales con muestras que son correspondientemente analizadas en tamices de laboratorio o por medio de partículas de referencia (Outotec, 2009). El CYCLONetrac PST hace la medición a través del impacto también necesita calibración para compensar las influencias del tipo de ciclón, tipo de mineral y el lugar de instalación del sensor. Para asegurar una buena calibración compuesta o combinada que pueda aplicarse a todos los ciclones dentro de una batería, se debe tomar muestras de calibración del overflow de cada uno de los ciclones en una batería. Cuando se efectúa dicha calibración, ya no es necesario volver a realizarla, ni siquiera cuando se reemplaza el sensor. Además, se debe tomar muestras más allá del ámbito de operación esperado de los ciclones para asegurar una medición precisa cuando el ciclón está trabajando fuera de su rango normal de operación, incluyendo, pero no limitándose a eventos de descarga en forma de cuerda, arranques, detenciones y vaciados. De esta manera se evita la incerteza de la medición que se produce cuando se utilizan modelos de calibración para extrapolar las mediciones más allá del rango calibrado.

Comparación de la Tecnología CYCLONetrac PST

La tecnología CYCLONetrac PST se diferencia del enfoque de medición de tamaño de partícula de varias formas. La Tabla 1 describe algunas de las diferencias claves entre las tecnologías disponibles utilizadas para medir el tamaño de partícula en los circuitos de conminución. El CYCLONetrac PST ha sido desarrollado para ofrecer una solución para la medición del tamaño de partículas en los circuitos de conminución. Una combinación demostrada de alta disponibilidad en línea, además de una alta tasa de frecuencia de actualización, permiten el control en lazo cerrado del circuito del producto.

Tabla 1 Comparación de tecnologías de medición de tamaño de partícula

Propiedades	CYCLONetrac PST	Medición Consolidada Tradicional del Flujo Overflow del Ciclón utilizando Pinzas, Ultrasonido o Difracción Láser	Tamizado en Laboratorio
Frecuencia de actualización	4 segundos	3-9 minutos	Generalmente 2 horas con 12-24 horas de latencia
Permite control sostenible en circuito cerrado	Sí	No (generalmente limitado por la disponibilidad del sistema y la latencia de la información)	No
Análisis de flujo completo	Sí	No	No
No necesita muestreador	Sí	No	Sí
Disponibilidad	>98%	Generalmente baja, con excepciones	Alta
Número de tamaños de partículas informados^a	Sólo el tamaño clave de partículas necesario para el control. (2 o más posiblemente en el futuro)	Múltiples ^b	Múltiples ^b
Frecuencia de calibración	Una vez	Continua	N/A
Monitoreo de funcionamiento de cada hidrociclón	Sí	No	Posible, pero no lo habitual

- a. La mayoría de los sistemas de control existentes sólo utilizan un tamaño de partícula como dato
- b. Los tamaños múltiples generalmente incluyen un tamaño informado al sistema de control, el resto es para información general y monitoreo del proceso.

ESTRATEGIAS DE CONTROL Y SUS BENEFICIOS

Con la tecnología del sistema PST se puede contar con dos estrategias básicas de control. Primero, la medición del tamaño de partícula individual permite usar una estrategia de control del nivel de batería a partir de la cual se combinan las mediciones individuales en una medición única, como puede ser el valor de la mediana. La señal mediana puede utilizarse para ajustar otros parámetros como la densidad de alimentación, la presión de la batería, tonelaje de alimentación, etc., para ajustar el tamaño de partícula y lograr un término medio entre tamaño de partícula y rendimiento. Segundo, las mediciones individuales del tamaño de partícula también habilitan un control de nivel del ciclón que puede usarse para identificar los ciclones que están operando en forma deficiente y así poder tomar una acción correctiva reiniciando el ciclón o cerrándolo y abriendo la unidad de reemplazo. Ambas estrategias y sus respectivos beneficios se explican en las siguientes dos secciones.

Beneficios de Controlar el Tamaño de Partícula, Control del Nivel de la Batería

El tamaño de partícula del flujo de producto proveniente del circuito de molienda es un indicador clave de rendimiento (KPI) pues está directamente relacionado con la recuperación de mineral, la eficiencia de la planta de molienda y los rendimientos globales de la planta. Existe una compensación entre la entrada al circuito (i.e. alimentación fresca o tasa de procesamiento) y el producto del circuito (i.e. tamaño de partícula del flujo overflow del ciclón). Con el desarrollo del CYCLONEtrac PST se pone a disposición del mercado un sistema robusto de medición en línea del tamaño de partícula que permite desarrollar y optimizar los esquemas de control del tamaño de partícula que puede beneficiarse de este tipo de compensación que existe dentro de los límites del circuito.

Recientemente una planta concentradora de gran tamaño desarrolló un nuevo esquema de control de variables múltiples utilizando la tecnología CYCLONEtrac PST. La eficiencia de la molienda se conserva al mantener el tamaño de partícula y la potencia del molino de bolas dentro del rango deseado por medio de la manipulación del porcentaje de sólidos alimentados al ciclón. La Figura 2 muestra un ejemplo de las variables que se controlan y sus puntos de ajuste/objetivos.

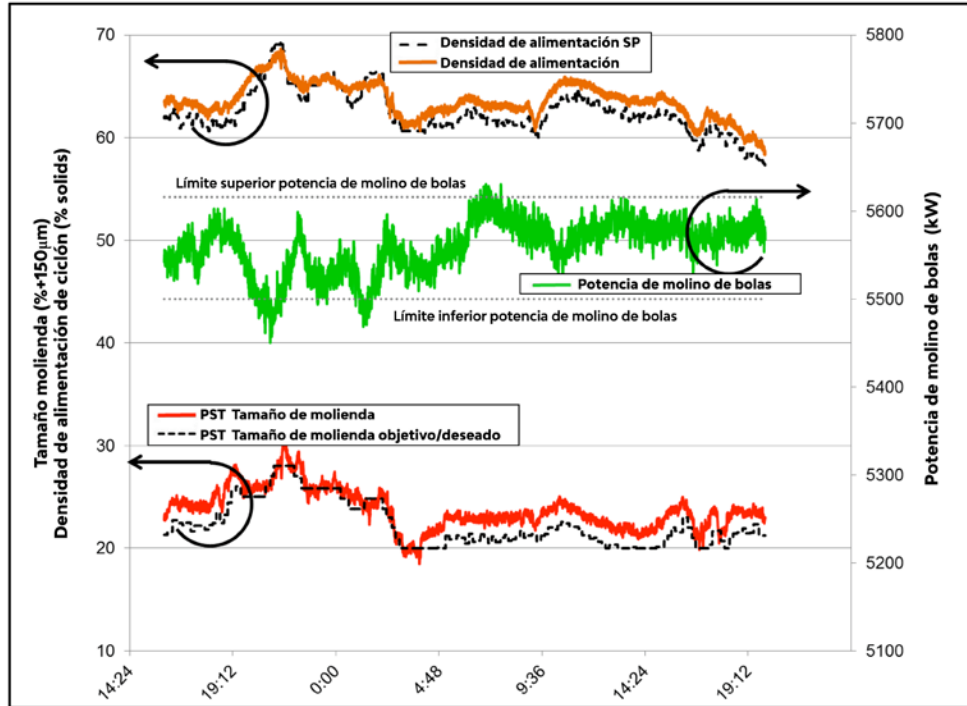


Figura 2 Ejemplo de control con CYCLONEtrac PST

Una publicación de Cirulis et al, 2015, describe el caso de estudio y control con más detalles. Al utilizar un esquema de control utilizando el CYCLONEtrac PST la operación pudo demostrar:

- hasta un 4,5% de reducción del tamaño de partícula con el mismo rendimiento
- hasta un 10% de aumento del rendimiento con un mismo tamaño de partícula

Beneficios de realizar mediciones en cada ciclón, Control del Nivel de Ciclón

Hasta ahora existía instrumentación en cada ciclón, haciendo entonces muy difícil poder identificar los ciclones que estuvieran teniendo un comportamiento deficiente y además cuantificar este efecto sobre el proceso de molienda-clasificación. Un solo ciclón que esté funcionando en forma deficiente puede tener un impacto importante sobre la molienda en general y el circuito de clasificación y, además, causar una interrupción grave a los procesos aguas abajo. Los impactos más importantes incluyen, pero no se limitan a:

- Prolongados períodos de detención debido al bloqueo de las celdas, tuberías de pulpa o estanques.
- Pérdida de eficiencia debido a una deficiente recuperación de partículas gruesas

Las causas raíz de estas situaciones son diversas, pero generalmente se relacionan con el bloqueo del ciclón (revestimiento, objeto extraño) o por exceder la capacidad del ciclón, que está definida por la presión, flujo y dimensiones del mismo. En la Figura 3 se muestra el ejemplo de un ciclón (Ciclón 7) que entra a un estado de fuera de línea después de un aumento del 10% en la alimentación del molino

SAG. Debido a la interrupción del circuito de la alimentación del ciclón, la carga en los otros ciclones se reduce y se puede inferir por el menor tamaño de partícula del producto de cada ciclón. Cuando el ciclón 7 se cierra, se recupera el flujo de alimentación y presión del ciclón y luego de un alza abrupta de la presión, otros dos ciclones comienzan a funcionar en forma deficiente por diez minutos después de los cuales se cierran.

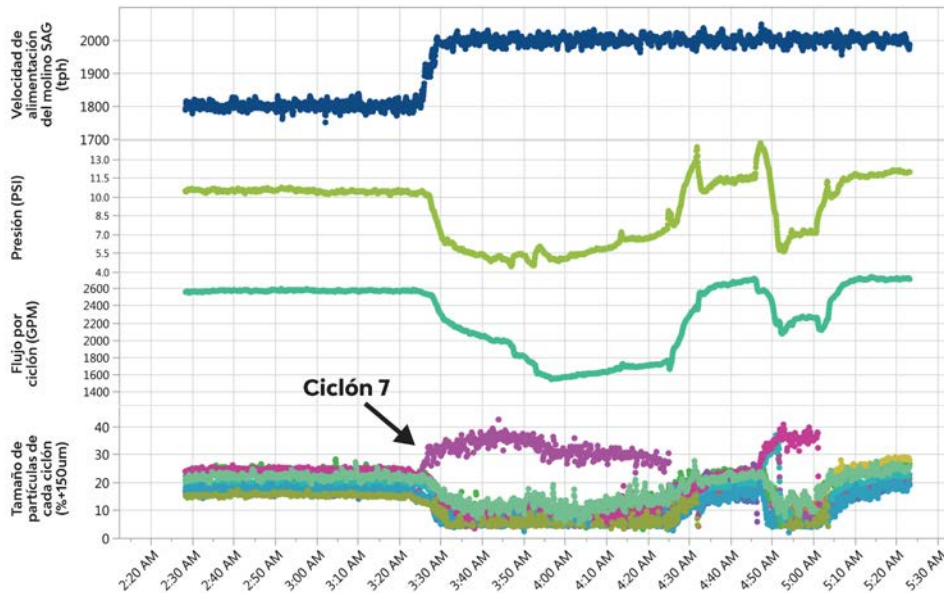


Figura 3 Ejemplo de un ciclón con rendimiento deficiente

Además de la situación relacionada con los ciclones fuera de línea como se muestra en la Figura 2, los ciclones dentro de una batería se comportan diferente durante la operación normal. Esto puede deberse a elementos tales como distribución dispareja del flujo y variabilidad de la tasa de desgaste. La tecnología CYCLONetrac PST permite un control activo del ciclón a partir del cual se obtiene una distribución óptima del tamaño de partícula asegurando que los ciclones de gruesos estén cerrados.

Por ejemplo:

A un intervalo de tiempo específico el ciclón de partículas más gruesas se cierra si excede en más de 1 sigma a la mediana de la señal del CYCLONetrac PST. Simultáneamente se abre otro ciclón para minimizar la alteración de la presión.

Para modelar la recuperación por ciclón como una función de la señal del CYCLONetrac PST se utilizaron datos obtenidos de una concentradora con una recuperación ya conocida. Luego se simuló los resultados del control del ciclón **utilizando la siguiente estrategia:**

1. Cada 30 minutos el ciclón de partículas más gruesas se cierra si excede en más de 1 sigma a la mediana de la señal del CYCLONetrac PST.
2. Cuando se cierra, su señal se reemplaza con la mediana (i.e. estadísticamente el nuevo ciclón da la mediana de la molienda)

La recuperación y el contenido de cobre en los relaves (colas) se recalcularon obteniendo un ahorro de aproximadamente \$2 millones al año con el control activo del ciclón. Esto no incluye los beneficios resultantes de la detección de un ciclón fuera de línea o un control global del tamaño de partícula, que puede ser un valor órdenes de magnitud mayor.

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN Y RESULTADOS

El CYCLONetrac PST requiere calibración como todos los métodos de medición en línea del flujo overflow de ciclones. En la sección "Principio de Operación" de este documento se describió brevemente la calibración del PST. La habilidad de calibrarse de acuerdo con una variedad de tipos de mineral, ciclones y ubicación de tuberías determina la robustez de su tecnología. Para evaluar este aspecto, a finales del año 2015 se decidió iniciar un programa para acumular toda la experiencia posible en la calibración del PST. El programa examinó los datos de las instalaciones comerciales existentes en baterías completas de ciclones y también la información obtenida de las calibraciones realizadas a los ciclones individuales. En las Figuras 4 y 5 se muestran algunos ejemplos de los resultados de calibración obtenidos para cada tipo de instalación. En total, se analizaron nueve instalaciones diferentes cubriendo cuatro tipos de minerales (cobre, oro, hierro, fosfato), cuatro tipos de ciclones, con orientaciones que variaban dentro del rango horizontal a vertical, con sensores ubicados en las de tuberías de overflowen distintas posiciones desde horizontal a vertical. Los detalles de este trabajo fueron publicados anteriormente (O'Keefe, C., Maron, R., Cirulis, D., Medina, J., 2016). La conclusión de este trabajo es que la tecnología de medición de tamaño de partículas basada en el impacto acústico implementada por el CYCLONetrac PST ha demostrado un excelente funcionamiento cuando se compara con los datos obtenidos a través del muestreo y tamizado para diversos tipos de mineral y distintos tipos de ciclones y sus orientaciones, configuraciones de tuberías de overflow y tamaños de partículas. Las diferencias entre las mediciones realizadas por el PST y las de las muestras tamizadas son bastante bajas y se deben tanto al ruido de la medición y las incertezas de tamizado de las muestras.

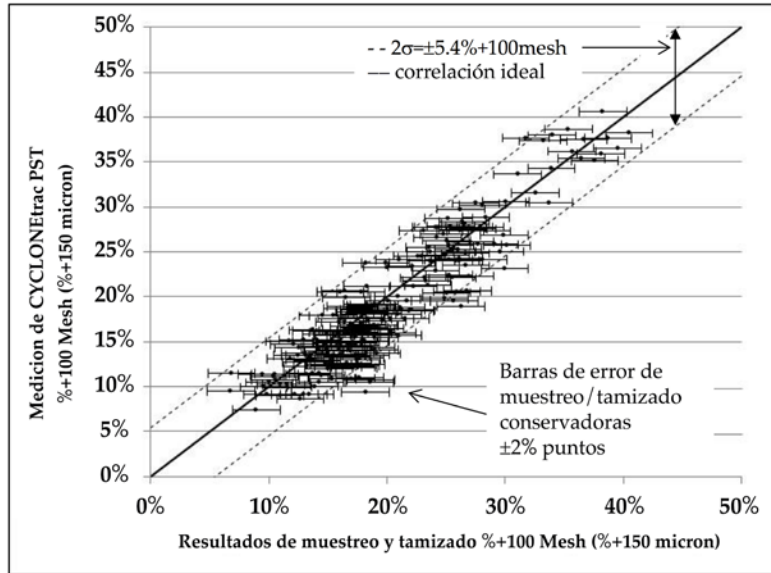


Figura 4 Mediciones de 150 micrones realizadas por CYCLONEtrac PST comparadas con las muestras tamizadas en una concentradora de cobre de gran tamaño

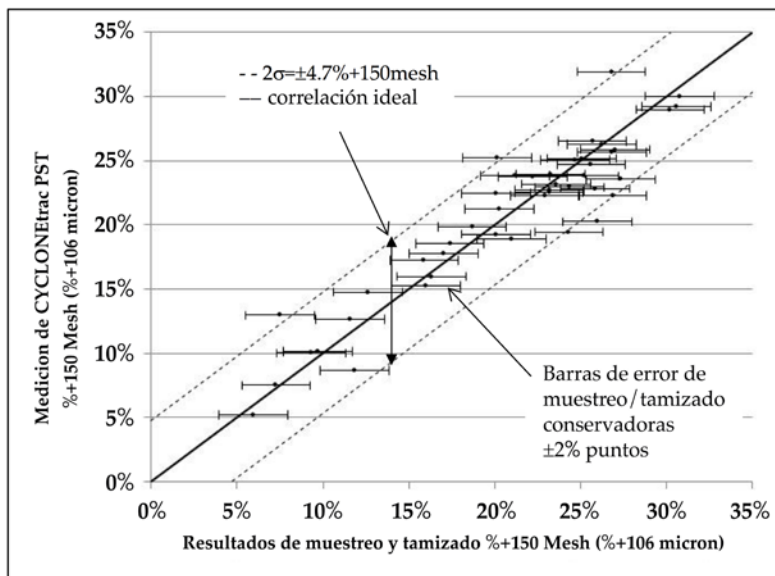


Figura 5 Mediciones de 106 micrones realizadas por CYCLONEtrac PST comparadas con las muestras tamizadas en una concentradora de oro

CONCLUSIÓN

CiDRA Minerals Processing ha desarrollado una tecnología de medición de tamaño de partículas en línea que ofrece ventajas significativas con respecto de lo que se considera como equipamiento estándar en la industria actualmente. El sistema de rastreo de tamaño de partícula CYCLONEtrac PST ha sido instalado comercialmente en dos plantas concentradoras de gran tamaño. Este documento ha sido elaborado para ofrecer una comparación entre tecnologías y analizar los beneficios que se pueden obtener al instalar el Sistema PST. El uso del sistema CYCLONEtrac PST en un esquema de control de partícula global ha demostrado obtener beneficios económicos importantes en una concentradora de gran tamaño. Más aún, el uso del CYCLONEtrac PST para el control activo de cada ciclón ofrece beneficios económicos adicionales a la operación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la cooperación del personal de diversas plantas durante la instalación y calibración de los sistemas CYCLONEtrac PST.

REFERENCIAS

- Cirulis, D., Dunford, S., Snyder, J., Bartsch, E., Rothman, P., Maron, R., Newton, D., O'Keefe, C., and Mercuri, J. (2015) 'Process optimization using real time tracking of coarse material in individual cyclone overflow streams', *Metplant 2015*, Perth, Australia, 7-8 Sep.
- O'Keefe, C., Maron, R., Cirulis, D., and Medina, F. (2016) 'Survey of Real-Time Individual Cyclone Particle Size Tracking (PST) In Multiple Concentrators', *Automining 2016*, Santiago, Chile, 30 Nov – 2 Dec.